PROF. ROSARIO FEDERICO
ORDINARIO DI FISICA E MATEMATICA NEL R. LICEO «ALFIERI» DI TORINO

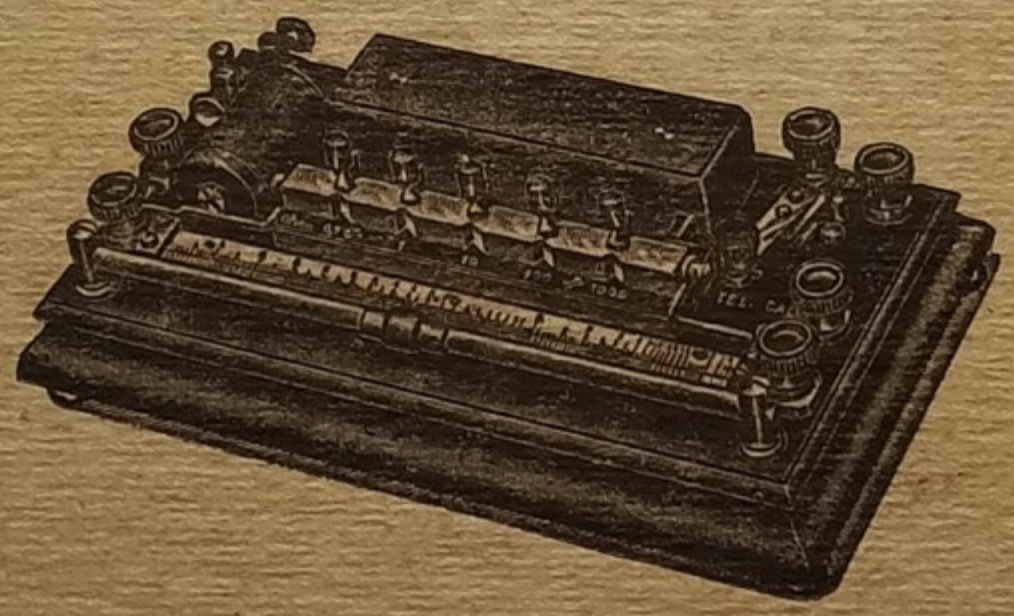
TRATTATO ELEMENTARE DI FISICA

PER GLI ISTITUTI TECNICI INDUSTRIALI - AGRARI - NAUTICI E PER GEOMETRI

VOLUME SECONDO

OTTICA - ELETTRICITÀ E MAGNETISMO

CON 598 FIGURE, 1 TAVOLA SPETTROSCOPICA A COLORI
E NUMEROSI ESERCIZI E PROBLEMI



1935 - XIII
TORINO - S. LATTES & C. - EDITORI

TRATTATO ELEMENTARE DI FISICA

DELLO STESSO AUTORE:

TRATTATO ELEMENTARE DI FISICA

PER GLI ISTITUTI TECNICI AGRARI, INDUSTRIALI, NAUTICI E PER GEOMETRI

VOLUME I: *Meccanica dei solidi e dei fluidi - Termologia - Acustica*
Con 512 figure, e numerosi esercizi e problemi; pagg. XVI-364
L. 16

ELEMENTI DI FISICA

PER I LICEI CLASSICI ED ALTRE SCUOLE MEDIE SUPERIORI

VOLUME I: *Meccanica - Termologia - Acustica*
2ª edizione con 418 figure e circa 200 esercizi; pagg. VIII-290 L. 16

VOLUME II: *Ottica - Elettricità e Magnetismo - Meteorologia e Cosmografia*
2ª edizione con 560 figure, una tavola spettroscopica a colori e oltre 100 esercizi; pagg. IV-362 . . . . . L. 18

CORSO ELEMENTARE DI FISICA

PER I LICEI SCIENTIFICI

VOLUME I: *Meccanica dei solidi e dei fluidi*
Con molti problemi ed esercizi e 365 figure; pagg. 246 . . L. 14

VOLUME II: *Acustica - Calore - Meteorologia - Cosmografia*
Con molti problemi ed esercizi e 223 figure; pagg. 196 . . L. 12

VOLUME III: *Ottica - Elettricità e Magnetismo*
Con molti problemi ed esercizi e 571 figure; pagg. 380 . . L. 18

FISICA ELEMENTARE

PER GLI ISTITUTI TECNICI COMMERCIALI E MAGISTRALI

5ª edizione con 515 figure e una tavola spettroscopica a colori; pagg. VIII-360 . . . . . L. 18

SUNTI DI FISICA

PER LE SCUOLE MEDIE

10ª edizione con 367 figure; pagg. VIII-250 . . . . . L. 15

TAVOLE DEI LOGARITMI

E DEI VALORI NATURALI DELLE FUNZIONI CIRCOLARI
con 5 cifre decimali e con l'approssimazione a meno di 0,000 002
Tavole aritmetiche di uso frequente

4ª edizione - Volume legato in cartoncino; pagg. 188 . . . L. 8

I FENOMENI DELLA NATURA

NOZIONI DI FISICA, CHIMICA E MINERALOGIA
PER LE SCUOLE SECONDARIE DI AVVIAMENTO PROFESSIONALE

8ª edizione con 352 figure; pagg. VIII-204 . . . . . L. 10

NOZIONI DI FISICA E CHIMICA

PER LE SCUOLE TECNICHE INDUSTRIALI

2ª edizione con 248 figure e numerosi esercizi; pagg. IV-212 L. 12

LE MACCHINE NELL'INDUSTRIA E NELLA VITA

ELEMENTI DI SCIENZE APPLICATE

3ª edizione con 315 figure e numerosi esercizi; pagg. VIII-230 L. 12

PROF. ROSARIO FEDERICO

ORDINARIO DI FISICA E MATEMATICA NEL R. LICEO «ALFIERI» DI TORINO

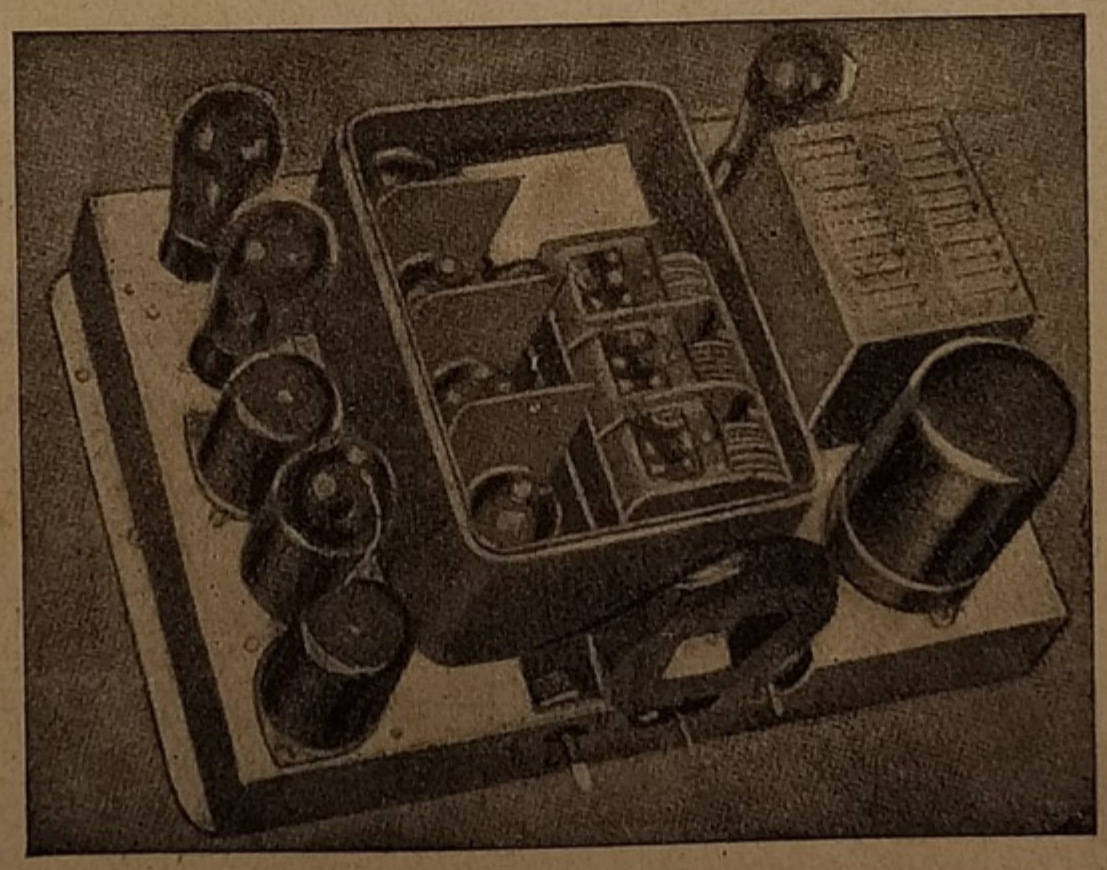
TRATTATO ELEMENTARE DI FISICA

PER GLI ISTITUTI TECNICI INDUSTRIALI - AGRARI - NAUTICI E PER GEOMETRI

VOLUME SECONDO

OTTICA - ELETTRICITÀ E MAGNETISMO

CON 598 FIGURE, 1 TAVOLA SPETTROSCOPICA A COLORI E NUMEROSI ESERCIZI E PROBLEMI



1935 - XIII

TORINO - S. LATTES & C. - EDITORI

PROPRIETÀ LETTERARIA

R. Federica

Tip. VINCENZO BONA - Via Mario Gioda, 3 - Torino (17621).

PARTE IV.

OTTICA

OTTICA GEOMETRICA

Propagazione della luce.

1. **Luce - Sorgenti luminose.** — Chiamasi luce tutto ciò che impressiona il nostro occhio; essa è quindi la causa per cui vediamo gli oggetti. L'**Ottica** studia i fenomeni luminosi.

Vi sono corpi che emettono luce propria; tali sono il Sole, le stelle, una lampada accesa: li chiamiamo **corpi luminosi** o **sorgenti luminose.** Vi sono corpi che non hanno luce propria; ma li vediamo perchè rimandano al nostro occhio la luce che ricevono da una sorgente luminosa: li chiamiamo **corpi oscuri** o **illuminati**, e sono la maggior parte. La Luna è un corpo illuminato, perchè la luce che ci manda è quella che riceve dal Sole.

La luce non è materia; un corpo sia all'oscuro che illuminato, ha esattamente lo stesso peso, per quanto possiamo rilevare coi mezzi più sensibili.

Vedremo in seguito come oggi si ammetta che la luce sia dovuta ad un rapidissimo moto vibratorio, delle ultime particelle che costituiscono la materia (§ 92); quindi dove vi è luce vi è moto, cioè *energia* (Vol. 1° - § 118). Per ciò parliamo di **energia luminosa.**

2. **Corpi trasparenti ed opachi.** — Vi sono dei corpi che si lasciano attraversare dalla luce, come il vetro, l'acqua, la carta, ecc.; li chiamiamo **trasparenti.** Essi si distinguono in: **diafani** se lasciano vedere gli oggetti, come il vetro comune; e **traslucidi** se pur lasciando passare la luce, non permettono di distinguere gli oggetti, come il vetro smerigliato, la carta, ecc.

Opachi sono i corpi che non lasciano passare la luce. Non vi sono corpi perfettamente opachi o perfettamente trasparenti; è questione di spessore. Il vetro è trasparente se ha lo spessore di pochi millimetri; ma una lastra di vetro spessa qualche metro, sarebbe opaca. Per convincersene basta guardare una lastra di vetro da finestra, dall'orlo; si vedrà colorata in

verde scuro, indizio di opacità. L'acqua di un bicchiere è ben trasparente; ma nel mare a 40 m. di profondità vi è buio completo, anche se alla superficie batte il sole [1].

Viceversa, l'oro è opaco; ma ridotto in foglie sottilissime dello spessore di un decimillesimo di millimetro, lascia passare una luce verdognola.

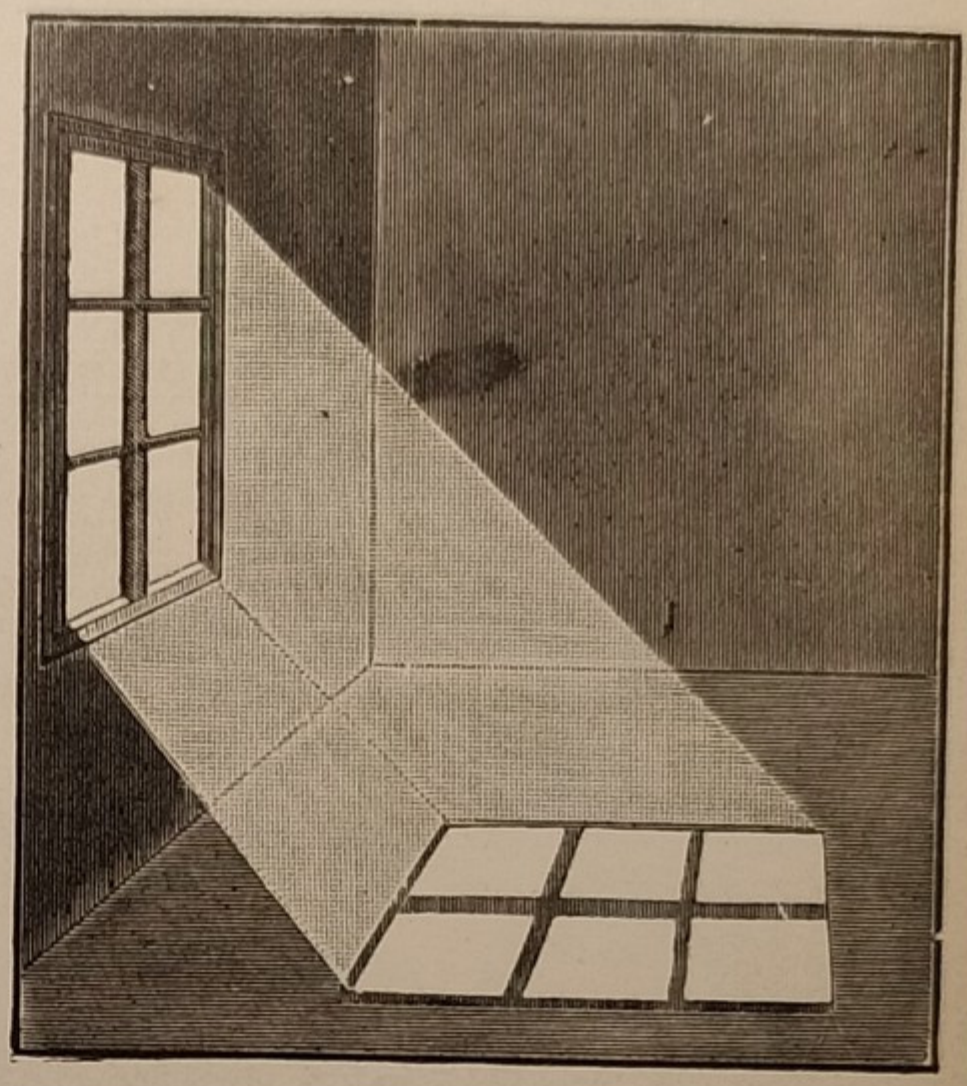


Fig. 1.

3. **Propagazione rettilinea della luce.** — *In un mezzo omogeneo, la luce si propaga in linea retta.* Per convincersene, basta guardare i raggi del Sole che entrano in fascio rettilineo da un foro nel tetto o da una finestra, (Fig. 1). Si noti che si vede la luce lungo il percorso dei raggi solari, perchè essi illuminano il pulviscolo dell'aria; senza di questo non si scorgerebbe traccia del passaggio della luce, la quale non si vede per sè stessa; ma si scorge in quanto si vedono i corpi da essa illuminati [2].

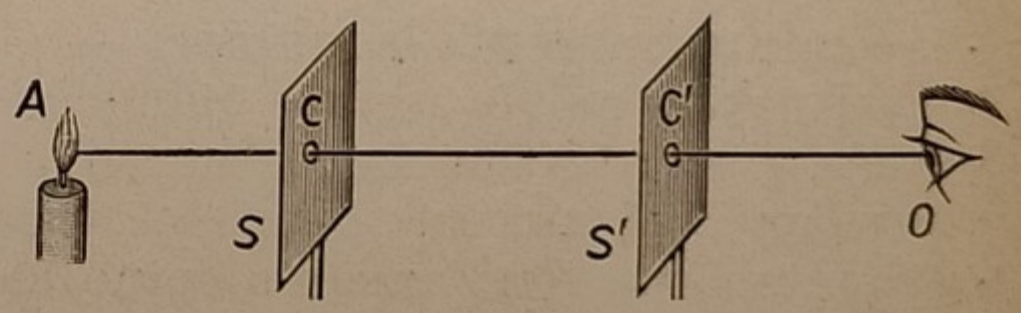


Fig. 2.

Un'altra esperienza per la prova della propagazione rettilinea della luce è la seguente: Si abbiano due *schermi* SS' (cioè due pezzi di cartone, o lastre di metallo, o tavolette, ecc.), aventi nel centro ciascuna un foro CC', così piccolo da potersi considerare come un punto, (Fig. 2). Posta la fiamma A di una candela dietro ad S, e guardando con l'occhio avanti ad S', non si scorge luce se non quando CC' e il centro della pupilla sono sulla stessa retta.

Chiamasi **raggio luminoso** qualunque semiretta avente l'origine in un punto luminoso. Un raggio luminoso quindi è una direzione nello spazio, una concezione geometrica; ma non è qualcosa di materiale o di realmente esistente. Da un punto luminoso partono i raggi in tutte le direzioni.

Si dice **fascio di luce** l'insieme dei raggi luminosi che attraversano una data superficie. Nel senso geometrico, essendo la superficie costituita da infiniti punti, un fascio luminoso sarebbe costituito da infiniti raggi; noi

---

(1) Si deve intendere per quanto si vede con l'occhio; perchè si è provato che la lastra fotografica può impressionarsi anche oltre i 500 m. di profondità.

(2) Per tale ragione il cielo è luminoso di giorno; se l'atmosfera fosse perfettamente trasparente, il cielo sarebbe nero anche di giorno. Per questo il cielo acquista una tinta azzurra tanto più cupa, quanto più ci innalziamo nell'atmosfera; sia salendo su un'alta montagna, sia con l'aerostato. Se potessimo sollevarci oltre l'atmosfera, il cielo ci apparirebbe completamente nero, e vi vedremmo contemporaneamente brillare il Sole e le stelle.

tuttavia, nel senso fisico, supporremo *il fascio costituito da un numero limitato di raggi*, (§ 83). Chiameremo:

1. *fascio di raggi divergenti*, quello che parte da un punto S (Fig. 3);

2. *fascio di raggi paralleli*, o *pennello di luce*, quello proveniente da un punto a distanza infinita (Fig. 4); es., i raggi di una stella. Praticamente consideriamo paralleli i raggi solari; sebbene in realtà non lo siano, non essendo il Sole un punto;

3. *fascio di raggi convergenti*, quelli che concorrono nello stesso punto S' (Fig. 5); ciò può ottenersi con opportuni mezzi (specchi o lenti), che studieremo in seguito.

Un fascio di raggi partenti dallo stesso punto (Fig. 3), o convergenti nello stesso punto (Fig. 5), si chiama *omocentrico*.

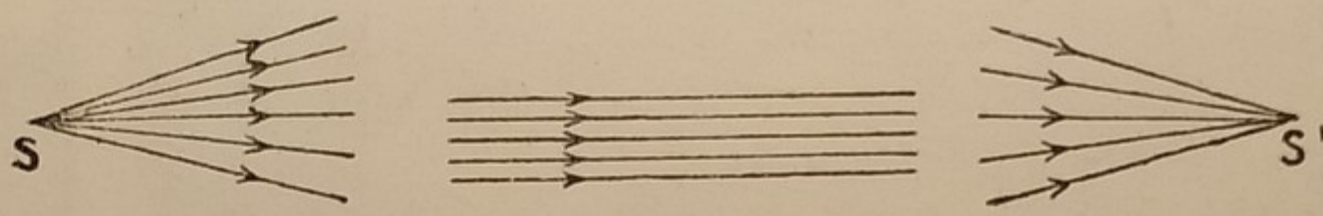


Fig. 3. Fig. 4. Fig. 5.

4. **Ombra.** — Ma la prova migliore della propagazione rettilinea della luce, è la formazione delle ombre.

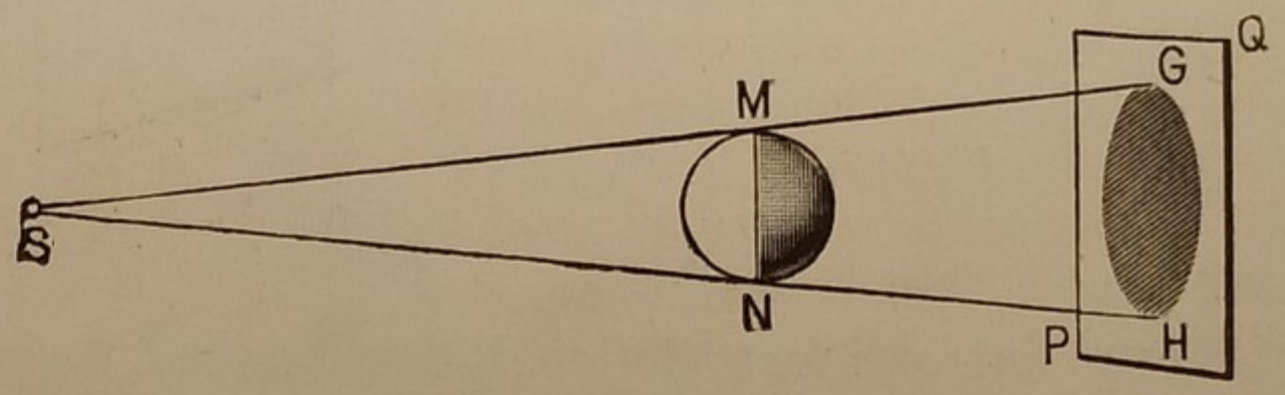


Fig. 6.

Sia S un punto luminoso (Fig. 6), MN un corpo opaco, ad es., una sfera. Consideriamo il cono che ha per vertice S e per generatrici le tangenti condotte da S su MN; questo cono tocca la sfera secondo una circonferenza, che divide la superficie sferica in due regioni: la parte verso S è illuminata; l'altra parte posteriore è nell'oscurità, e si chiama *ombra propria*. Dietro la sfera, tutti i punti interni al detto cono sono nell'ombra. Su uno schermo PQ (una tela tesa, una parete bianca, ecc.) vi sarà ombra dentro l'intersezione (GH) del cono con lo schermo, e si chiama *ombra portata*; vi è luce fuori di tale intersezione; e vi è passaggio netto, brusco, dall'ombra alla luce.

Problema. — *Qual'è il diametro dell'ombra di una sfera di cm. 10 di raggio, su uno schermo posto a m. 1,20 di distanza dal suo centro, se il punto luminoso dista dallo schermo m. 1,60?* (Si suppone lo schermo perpendicolare alla congiungente il punto luminoso col centro della sfera).

Soluzione. — Riferendoci alla Fig. 6, si ha:

distanza di S da MN: d = cm. (160 − 120) = cm. 40

» » S dallo schermo: d_1 = cm. 160

Essendo: $GH : MN = d_1 : d$, si ha sostituendo i valori dati:

$$x : 20 = 160 : 40\,, \qquad \text{da cui:} \qquad x = \text{cm.}\ \frac{160 \times 20}{40} = \textbf{cm. 80.}$$

5. **Penombra.** — Ma il caso precedente è solo teorico, non essendo possibile in pratica avere *un sol punto* luminoso; le sorgenti luminose comuni hanno sempre una certa estensione. Si possono dare due casi:

1. **La sorgente luminosa è più estesa del corpo opaco.** La sorgente S ed il corpo opaco M siano, ad es., due sfere. Consideriamo due coni for-

mati: il primo con le tangenti esterne ($PO-P'O'$), il secondo con le tangenti interne ($P'O-PO'$), comuni alle due sfere (Fig. 7). Il primo cono è il *cono*

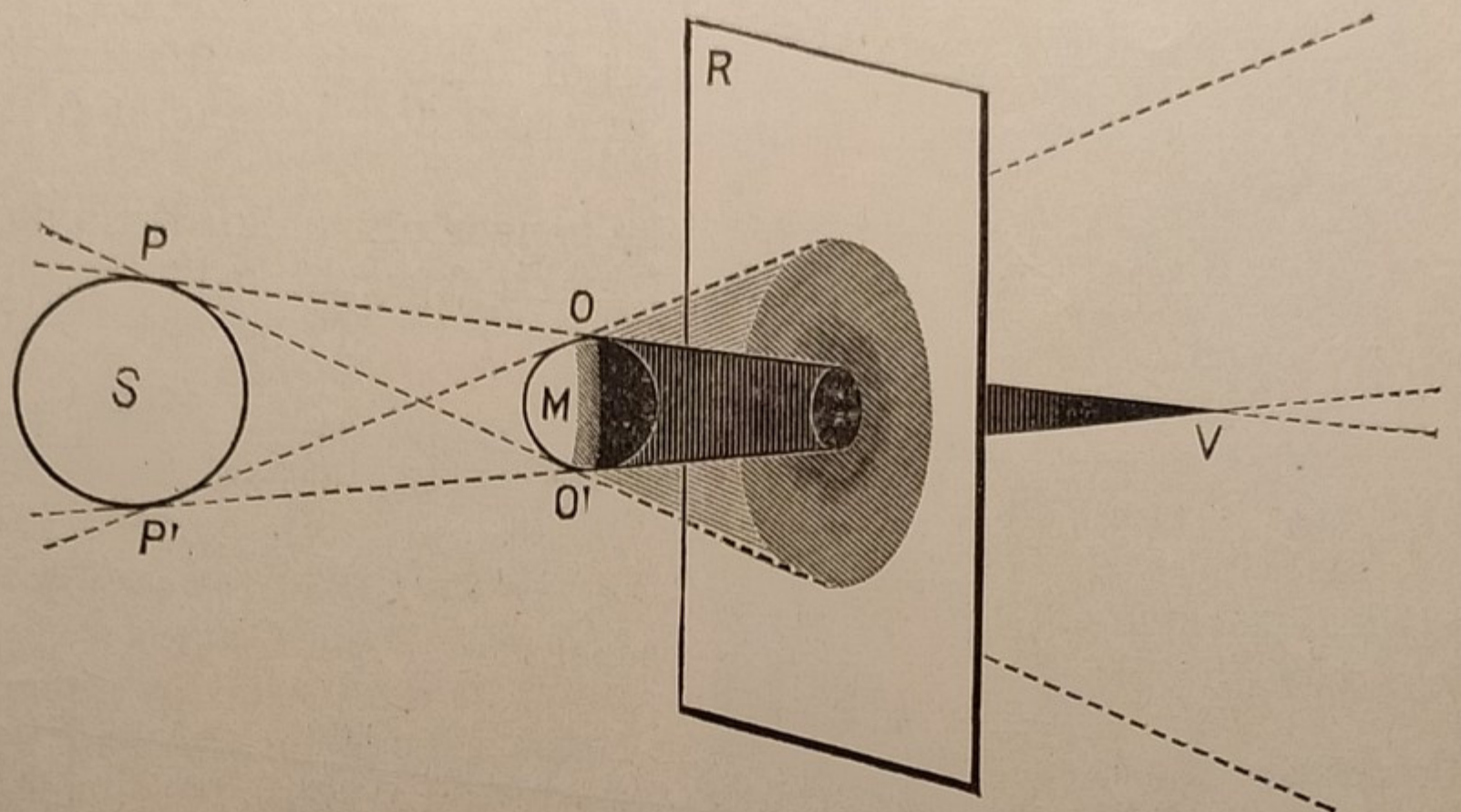


Fig. 7.

d'ombra; dentro di esso, dietro M, vi è ombra. Tra i due coni vi è *penombra*; cioè nè ombra nè luce completa, poichè vi arriva luce solo da alcuni, ma non da tutti i punti di S; fuori del secondo cono vi è luce.

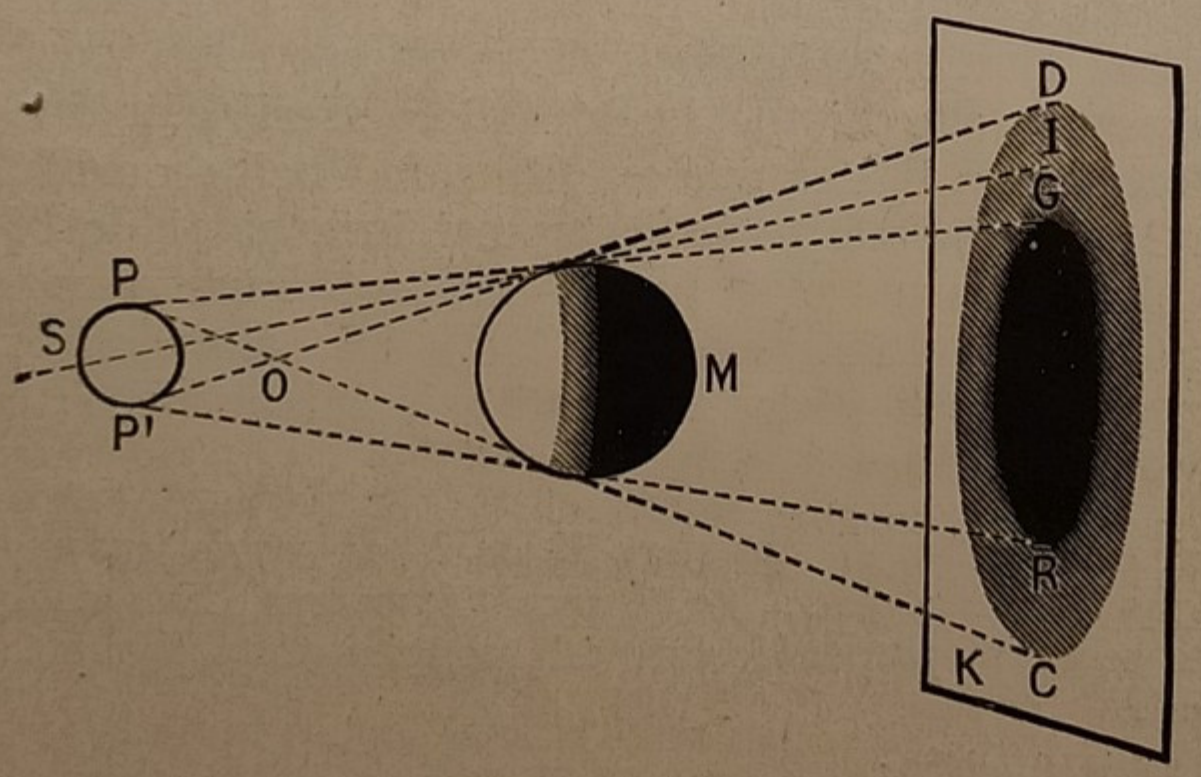


Fig. 8.

Su uno schermo R vi sarà in mezzo una zona d'ombra nell'intersezione col cono d'ombra; essa sarà circondata da un anello di penombra, di intensità degradante. Allontanando lo schermo da M, l'ombra diminuirà fino a ridursi a un punto al vertice V del cono; la penombra invece crescerà sempre, e al di là di V non vi sarà che penombra.

2. **La sorgente luminosa è meno estesa del corpo opaco.** — Il ragionamento è come nel caso precedente, e si tracciano ancora i due coni $PGP'R$ e $PCP'D$ delle tangenti esterne ed interne comuni ai due corpi, (Fig. 8). Ma in questo caso tanto l'ombra che la penombra crescono sempre più, quanto più si allontana lo schermo K dal corpo opaco M.

La penombra addolcisce i contorni delle ombre. Si ritagli su un cartoncino il contorno di una figura, come è indicato, ad es., nella Fig. 9; si ha così un cartoncino traforato. Si esponga alla luce di una candela, in modo da

fare ombra su una parete bianca. Se il cartoncino è vicino alla parete, l'ombra è a contorni duri, come in Fig. 10; se invece si allontana il cartoncino dal muro, la penombra sfuma i contorni, e si ottiene un'immagine a mezza tinta, come in Fig. 11.

Fig. 9.

Fig. 10.

Fig. 11.

6. **Camera oscura.** — Si chiama con tal nome una cassetta (Fig. 12), sulla faccia anteriore della quale vi sia un foro O così piccolo, che si possa considerare come un punto. Si ponga avanti a questo foro un oggetto luminoso; p. es., una casa AB. Da un punto A partono infiniti raggi di luce; ma uno solo di essi penetra nel foro O, e propagandosi in linea retta colpisce il fondo della cassetta in un punto A' eguale [1] ad A, che chiameremo l'**immagine** di A.

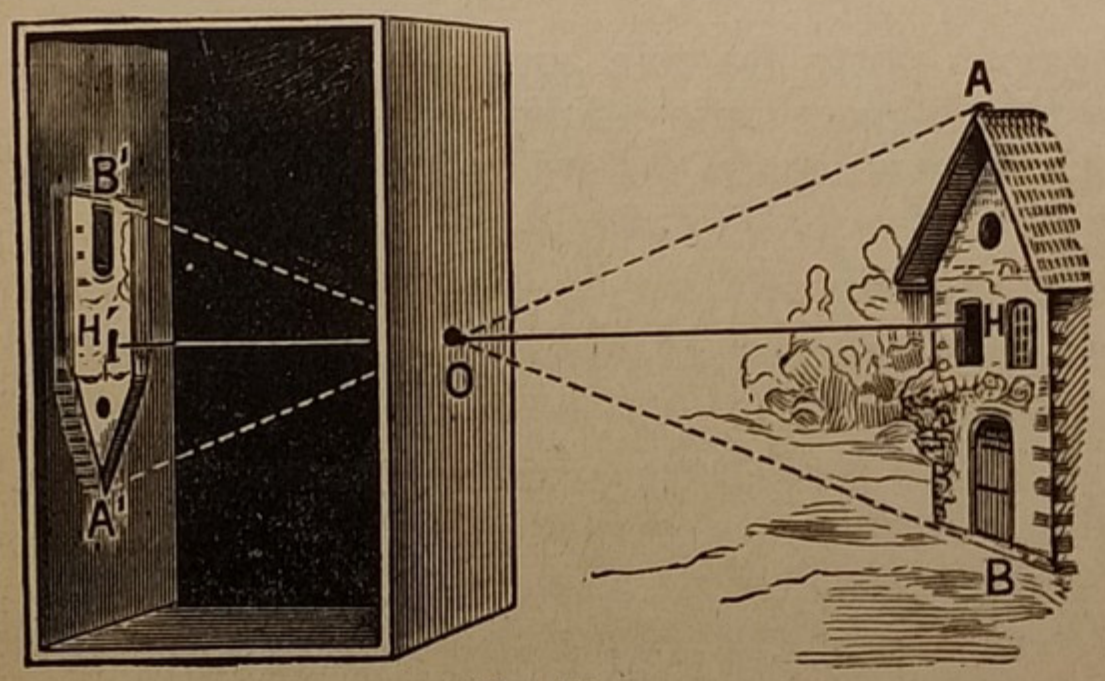


Fig. 12.

Parimenti un raggio BO partente da B, forma l'immagine B', e così pure per tutti gli altri punti dell'oggetto AB. Si forma in tal modo un'immagine $A'B'$ capovolta; di grandezza maggiore, eguale o minore dell'oggetto AB, secondo che la distanza OH' dell'immagine dal foro è anch'essa maggiore, eguale o minore della distanza OH dell'oggetto dal foro.

Infatti, per la similitudine dei triangoli AOB ed $A'OB'$ (considerando AB ed $A'B'$ come segmenti e paralleli), si ha che le basi stanno fra loro come le altezze; cioè:

$$A'B' : AB = OH' : OH.$$

Praticamente, non essendo possibile avere un foro puntiforme, ma di una certa estensione, ad ogni punto A non corrisponde un punto A': ma una piccola superficie intersezione del cono di vertice A e di sezione O, con il fondo della cassetta. Quindi l'immagine non è nitida, ma alquanto confusa.

Con lo stesso principio si spiegano le macchie *rotondeggianti* prodotte dal Sole attraverso piccoli fori di un solaio o il fogliame di un albero, *qualunque sia la forma di questi fori.*

---

(1) Otticamente diremo due punti eguali, se emanano luce dello stesso colore. Parimenti, l'eguaglianza o la similitudine tra due figure s'intenderà, oltre che nel senso geometrico, anche per l'eguaglianza ottica dei punti corrispondenti.

Tutti i ragionamenti fatti, sia sulle ombre sia sulla camera oscura, sono basati sulla propagazione rettilinea della luce; ma siccome l'esperienza conferma i risultati dedotti col ragionamento, così queste teorie valgono come dimostrazione che la luce si propaghi in linea retta.

Occorre però notare che questa propagazione rettilinea non è rigorosa; essa vale in complesso per gli oggetti di dimensioni comuni. In seguito, parlando della diffrazione (§ 98), vedremo come in realtà la luce può alquanto scostarsi dal cammino rettilineo. Inoltre il principio vale per la propagazione della luce in un mezzo omogeneo; quando la luce debba attraversare mezzi di diversa densità, vedremo in seguito che essa devia dalla direzione rettilinea, e può anche seguire un cammino curvilineo, (§§ 36-37).

Problemi da risolvere.

1. A quale distanza da un punto luminoso si deve collocare un disco (sottilissimo) di cm. 10 di diametro, per ottenere su un muro a m. 1,50 dal disco, un'ombra di cm. 80 di diametro? (La congiungente il punto luminoso col centro del disco, è normale a questo e al muro).

2. Una sfera opaca di 1 cm. di raggio è posta fra una sorgente luminosa e uno schermo; il suo centro è ad 1 m. dal centro della sorgente e dallo schermo. La sorgente è una sfera di 1 cm. di raggio; la congiungente i centri delle due sfere è normale allo schermo. Si domanda:

a) le dimensioni dell'ombra e della penombra;

b) che spostamento occorre dare alla sorgente e al corpo opaco, perchè la penombra diventi dieci volte più grande.

3. Un albero alto m. 10 è posto a m. 25 dal foro di una camera oscura, profonda cm. 40; determinare la grandezza dell'immagine.

Velocità della luce.

7. **Velocità della luce - Metodo di Roemer.** — Si credeva anticamente che la luce si propagasse istantaneamente. Ma allorchè cominciarono le osservazioni astronomiche con strumenti d'ingrandimento, si riscontrarono parecchi fatti che dimostravano che la luce metteva un tempo finito, e talvolta rilevante, a percorrere gli spazi celesti.

L'astronomo Cassini per il primo aveva osservato, che nella durata di rivoluzione del primo satellite di Giove si verificavano ora dei ritardi ora degli anticipi, collegati con la posizione della Terra rispetto a Giove; ma non ne approfondì la ragione.

Il Roemer [1] nel 1675, riprendendo l'esame di queste irregolarità, ne attribuì la causa alla propagazione della luce, e ne dedusse, con sufficiente approssimazione, il valore della velocità. Diamo un cenno di questo metodo, che va sotto il nome di **metodo astronomico.**

---

(1) Roemer Ole; n. ad Aarhuns nel 1644; m. a Copenaghen nel 1710.

La durata di rivoluzione del primo satellite intorno a Giove è di $1^d\,18^h\,27^m\,35^s$, e si misura dal tempo che decorre tra due occultazioni successive del satellite dietro a Giove.

Sia G Giove, I il satellite, T la Terra in varie posizioni della sua orbita, attorno al Sole S, (Fig. 13 [1]). Allorchè la Terra è in T_1 un osservatore vedrà occultarsi in O il satellite in un dato istante; lo stesso satellite proseguendo il suo moto ritornerà ad occultarsi nuovamente dopo aver fatto un giro; e nel frattempo la Terra si sarà spostata da T_1 a T_2. Ma essendo in queste due posizioni sensibilmente alla stessa distanza da Giove, in T_2 l'osservatore vedrà l'occultazione del satellite dopo un giro esatto di questo, cioè dopo il tempo suddetto di $1^d\,18^h\,27^m\,35^s$.

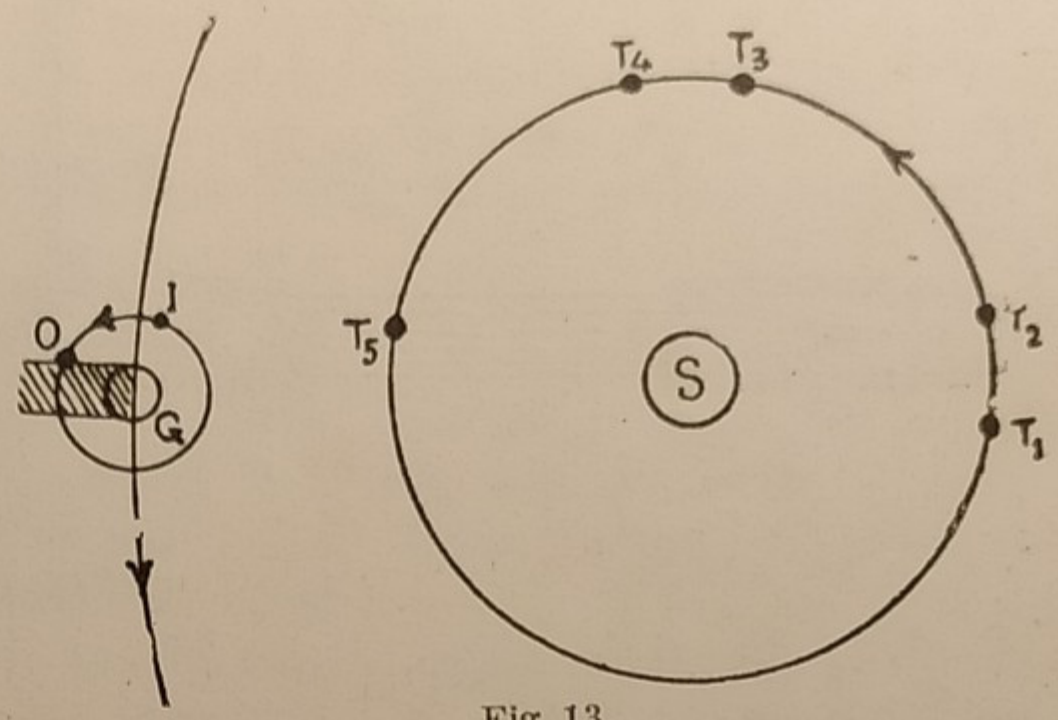


Fig. 13.

Non avverrà la stessa cosa dopo tre mesi, allorchè la Terra è arrivata in T_3; perchè nel tempo che il satellite compie un giro, essa si sposta da T_3 in T_4 e viene così più vicina a Giove; cioè la luce arriverà in T_4 qualche secondo prima che se la Terra fosse rimasta in T_3. Quindi si osserverà l'occultazione del satellite *con un anticipo di 15 secondi* che in T_1, e precisamente tanti secondi quanto è il tempo che impiega la luce a percorrere il tratto $OT_3 - OT_4$.

Dunque, nei sei mesi nei quali la Terra va da T_1 a T_5, si osserveranno dei successivi anticipi nella durata di rotazione del satellite; la somma di tutti questi anticipi è di 986 secondi, e tale tempo è quello che impiega la luce a percorrere la distanza T_5T_1, cioè il diametro dell'orbita terrestre.

Sapendosi che questo diametro è di 296 900 000 km, per la nota legge del moto uniforme (Vol. 1° - § 28), si ricava la velocità della luce:

$$v = \frac{s}{t} = \frac{\text{km. } 296\,900\,000}{986^s} = \text{circa } 300\,000 \text{ km. al } s.$$

Come riprova, nei sei mesi successivi, cioè nel ritorno della Terra da T_5 a T_1, allontanandosi essa da Giove, la luce dovrà percorrere un tratto maggiore ad ogni occultazione successiva del satellite; cioè si osserveranno ora dei successivi ritardi nella durata di rivoluzione di questo. Anche ora la somma di tutti questi ritardi nei sei mesi, corrisponderà al tempo impiegato dalla luce per percorrere il diametro dell'orbita terrestre, e dovrà essere eguale alla somma degli anticipi dei sei mesi precedenti.

Il numero trovato dal Roemer è stato confermato dalle misure eseguite con altri metodi; ed il risultato è sufficientemente approssimato, per la grande distanza in cui fu computato il percorso della luce.

---

(1) La Figura è schematica, non in proporzione.

8. **Metodo di Fizeau.** — Più tardi, nel 1849, il Fizeau [1] adottò il seguente metodo fisico per la determinazione della velocità della luce.

Sia A (Fig. 14) una sorgente luminosa, i cui raggi sono resi convergenti da una lente O e sono riflessi da una lastra di vetro S non argentata; passano fra due denti di una ruota dentata R, sono resi paralleli da un'altra lente convergente B e vanno a qualche chilometro di distanza [2] su una terza lente D, che li concentra su uno specchio piano P, perpendicolare alla direzione FP.

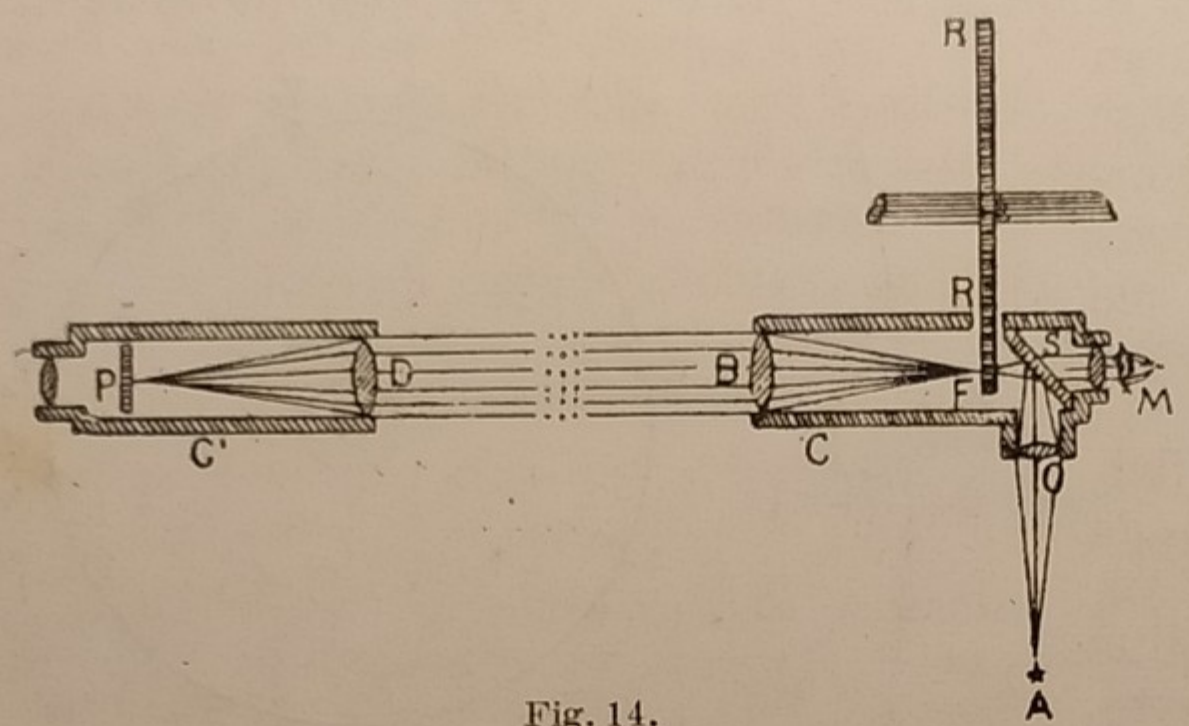


Fig. 14.

Lo specchio P riflette tali raggi nella stessa direzione da cui provengono (§ 13); essi pertanto ripassano fra i denti della ruota R, e battendo su S, che essendo vetro non argentato è insieme riflettente e trasparente, in parte attraversano S e cadono sull'occhio M di una persona, che guarda con un cannocchiale verso P: questa persona vede luce nella direzione di P.

Facciamo ruotare ora R rapidamente, con velocità crescente; avverrà ad un certo momento che un raggio di luce passa nel vano fra dente e dente, arriva su P e ne ritorna; nel frattempo la ruota ha girato di un poco e la luce al ritorno incontra il dente successivo al vano per cui è passata; il raggio è intercettato e guardando da M non si vedrà più luce.

In tale momento, con apposito contagiri, si misuri il numero n dei giri per secondo compiuti dalla ruota; un giro sarà fatto in $1/n$ di secondo; se la ruota ha d denti, il tempo per il passaggio di un dente sarà $1/n : d = 1/nd$ ed il tempo t per il passaggio da un vano al dente successivo, sarà la metà del precedente:

$$t = \frac{1}{2\,n\,d}\,.$$

In tale tempo la luce percorre due volte il tratto SP; cioè lo spazio percorso dalla luce:

$$s = 2\,(S\,P)\,,$$

è il doppio della distanza tra la ruota R e lo specchio P, distanza accuratamente misurata in precedenza.

La velocità della luce sarà allora, per la solita legge del moto uniforme:

$$v = \frac{s}{t} = 2\,(S\,P) : \frac{1}{2\,n\,d} = 4\,n\,d\,(S\,P)$$

e si deduce la velocità della luce in base al numero n fornito dall'esperienza.

---

(1) Fizeau Armand; n. a Parigi nel 1819, m. a Venteuil nel 1896.

(2) Le esperienze di Fizeau furono eseguite tra Suresnes e Montmartre, alla distanza di 8633 m.

Come riprova, raddoppiando la velocità della ruota si ritornerà a veder luce; perchè un raggio che passa per un vano, al ritorno ripassa per il vano successivo. Triplicando la velocità della ruota, si ritorna a intercettare il raggio sul secondo dente consecutivo al vano per cui è passato il raggio. E così via: si ottengono per la velocità della luce diversi numeri di cui si fa la media, per ottenere un valore più approssimato.

Con questo metodo il Fizeau ottenne per la velocità della luce 313 274 $^{km}/_{s}$; ma nel 1878 Cornu, con lo stesso metodo e con apparecchi più perfezionati, trovò 300 320 $^{km}/_{s}$; e più recentemente, nel 1881, Young e Forbes trovarono 301 380 $^{km}/_{s}$.

9. **Metodo di Foucault.** — Foucault [1], nel 1862, riuscì a misurare la velocità della luce in un percorso di pochi metri. Ciò è importante per poter misurare la velocità della luce nell'acqua, la quale non permette il passaggio della luce oltre poche decine di metri, (§ 2). Descriviamo brevemente tale metodo, che era stato consigliato da Arago.

Un punto luminoso L invia un fascio di raggi su una lastra di vetro V (Fig. 15), che in parte li riflette nella direzione VS; questi raggi vengono concentrati da una lente convergente C su uno specchietto piano S, che può ruotare velocemente intorno ad un asse perpendicolare al piano del foglio. I raggi sono riflessi da S su un altro specchio concavo B, il cui centro di curvatura è in S, e che dista da questo una decina di metri. I raggi da B sono riflessi e concentrati su S e da questo rimandati indietro nella direzione SV; attraversano V che è trasparente, e formano in A_1 un'immagine di L, che si osserva con la lente O.

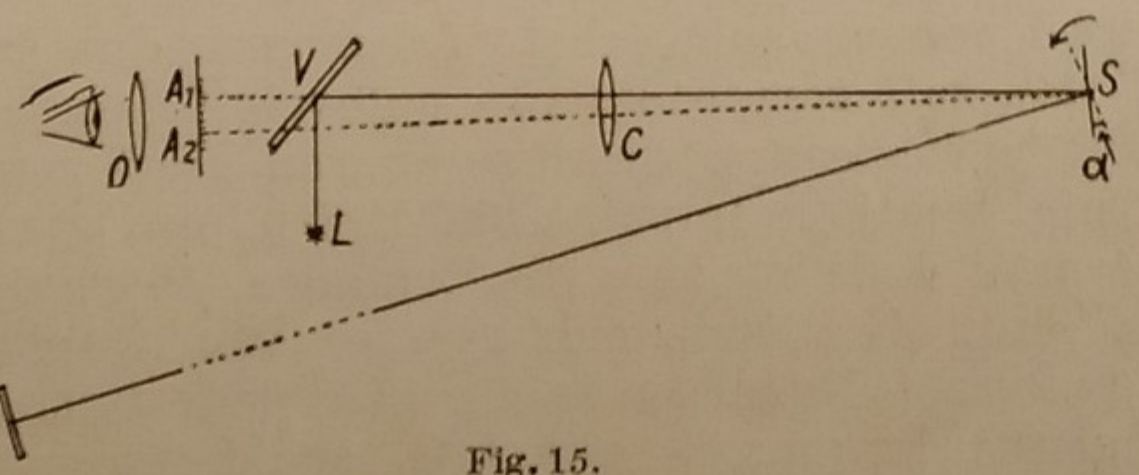


Fig. 15.

Supponiamo ora che lo specchio S ruoti velocemente; nel tempo che la luce da S va su B e da questo è rimandata su S, quest'ultimo avrà ruotato di un piccolo angolo α, e rifletterà il raggio luminoso non più nella direzione SA_1, ma nella direzione SA_2. Da O si osserverà un piccolo spostamento A_1A_2 dell'immagine di L, che si può misurare. Conoscendo A_1A_2 e la distanza SA_1, si può calcolare l'angolo A_1SA_2, e quindi α che è la sua metà, (§ 15). Misurando con un contagiri il numero di giri per secondo compiuti dallo specchio S, si può calcolare il tempo in cui S ha ruotato di α: che è anche il tempo in cui la luce ha percorso la doppia distanza SB, nell'andata e nel ritorno. Misurata questa distanza, si calcola, con la solita legge del moto uniforme, la velocità della luce.

Data l'enorme velocità di questa, e volendone limitare a pochi metri il percorso SB in cui si misura, per ottenere uno spostamento A_1A_2 misurabile, occorreva imprimere allo specchio S velocità di rotazione grandissime. Foucault riuscì a costruire una piccola turbina, funzionante ad aria compressa, simile alla sirena di Cagnard de Latour (Vol. 1° - § 367), che

---

(1) Foucault Jean Bernard Léon; n. a Parigi nel 1819, m. ivi nel 1868.

permetteva di ottenere la rotazione di uno specchietto circolare, del diametro di pochi millimetri, con la velocità di 1000 giri al minuto secondo!

Dalle misure di Foucault la velocità della luce nell'aria risultò di 298000 $^{km}/_{s}$.

Interponendo tra S e B un tubo, chiuso alle estremità da lastre di cristallo e contenente acqua, si è misurata la velocità della luce nell'acqua, che è di circa 225000 $^{km}/_{s}$; e in generale si è trovato che: *la velocità della luce diminuisce con l'aumentare dell'indice di rifrazione* (§ 32) *della sostanza in cui si propaga*, (§ 97):

Altre misure più recenti sono quelle di A. Michelson (1926) negli Stati Uniti; dalle quali risulta che la velocità della luce nell'aria è di 299800 $^{km}/_{s}$, con l'approssimazione di 4 km. Questa velocità è eguale per le diverse radiazioni, cioè per i diversi colori.

10. **Conseguenze sulla velocità della luce.** — Questa velocità è enorme, e si assume come la massima velocità esistente e possibile in natura. È così grande che se la luce potesse compiere un percorso circolare, farebbe in un minuto secondo circa 7,5 volte il giro della Terra (1).

Quindi non vi è tempo apprezzabile fra il momento in cui si produce un fenomeno sulla terra ed il momento in cui lo si vede.

Ma tale tempo diventa notevole ed anche grandissimo, quando la luce debba percorrere distanze enormi, quali sono quelle esistenti fra gli astri. Infatti la luce impiega più di 8 minuti primi per arrivare dal Sole a noi; 4 anni dalla stella α del Centauro, 46 anni dalla stella polare, e migliaia di anni da alcune nebulose lontane. Questo fatto ci dà meglio l'idea di quanto sia immensa la distanza delle stelle, che non è più possibile esprimere in km; ma che si valuta usualmente *in anni di luce* o **luxan** (2). Onde le stelle che noi guardiamo, non ci appaiono come sono realmente oggi; ma come erano anni e secoli addietro, allorchè è partita da esse la luce che arriva oggi al nostro occhio. E se un essere soprannaturale guardasse oggi la Terra da una stella lontana, e potesse scorgerla così come la vediamo noi da vicino, egli vedrebbe oggi avvenimenti per noi passati, che sono avvenuti sulla Terra anni e secoli addietro; tutto il nostro passato è cioè il presente in diversi punti dello spazio.

Problemi da risolvere.

1. In un'esperienza col metodo di Fizeau, la ruota dentata aveva il diametro di mm. 80, e i denti erano alla distanza di mm. 2 uno dall'altro; a quale velocità doveva essa ruotare per ottenere la prima estinzione della luce, se la distanza dello specchio dalla ruota era di km. 4?

2. Calcolare il tempo necessario alla luce per arrivare dal Sole, sapendo che la distanza dalla Terra al Sole è di km. 150 milioni.

3. La luce della stella polare impiega 46,5 anni per arrivare alla Terra; quanti miliardi di km. è la distanza di tale stella da noi?

4. Riferendosi alla Fig. 15, in un'esperienza con l'apparecchio di Foucault per la misura della velocità della luce, era: A_1S = m. 10,50; SB = m. 12. Calcolare lo spostamento A_1A_2, supponendo che la velocità di rotazione dello specchio fosse di 800 giri al secondo.

---

(1) Si ricordi che il meridiano terrestre è lungo 40000000 di m.
(2) Un *luxan* = km. 9460 miliardi (circa).

RIFLESSIONE DELLA LUCE

Leggi della riflessione.

11. **Assorbimento - Riflessione - Diffusione - Rifrazione.** — Allorchè un fascio di raggi batte sulla superficie di un corpo, può dar luogo a quattro fenomeni diversi:

1. **L'assorbimento.** La luce è assorbita dal corpo: ciò avviene, p. es., su un panno nero. Vediamo nero ciò da cui il nostro occhio non riceve luce; quindi i raggi luminosi che colpiscono un corpo nero, rimangono assorbiti da esso, e non ritornano indietro.

2. **La riflessione.** La luce è rimandata indietro: in modo però che se *un* raggio di luce colpisce la superficie del corpo, ritorna indietro ancora *un* solo raggio, in una sola direzione. Questo fenomeno si chiama la *riflessione regolare*, o semplicemente *riflessione* della luce.

3. **La diffusione.** La luce che batte sul corpo, è rimandata indietro in tutte le direzioni. Un foglio di carta, anche se riceve i raggi solari, cioè raggi luminosi in una direzione sola, è veduto da tutti i punti di una stanza; cioè rimanda la luce in tutte le direzioni. Questo fenomeno è una riflessione irregolare della luce in tutti i sensi, e si chiama *diffusione della luce.*

4. **La rifrazione.** Il corpo su cui cade la luce è trasparente, ed il raggio luminoso procede oltre nell'interno del corpo. Questo fenomeno si chiama la *rifrazione della luce.*

12. **Leggi della riflessione.** — In questo Capitolo ci proponiamo di studiare il 2° caso; cioè la riflessione regolare.

Si chiama **specchio** un corpo levigato che rifletta regolarmente la luce. Non vi è alcun corpo che rifletta totalmente la luce che riceve; l'argento lucido è il corpo che ha il maggior *potere riflettente*, che può raggiungere anche il 97 % dei raggi che cadono sul corpo; il 3 % rimane assorbito.

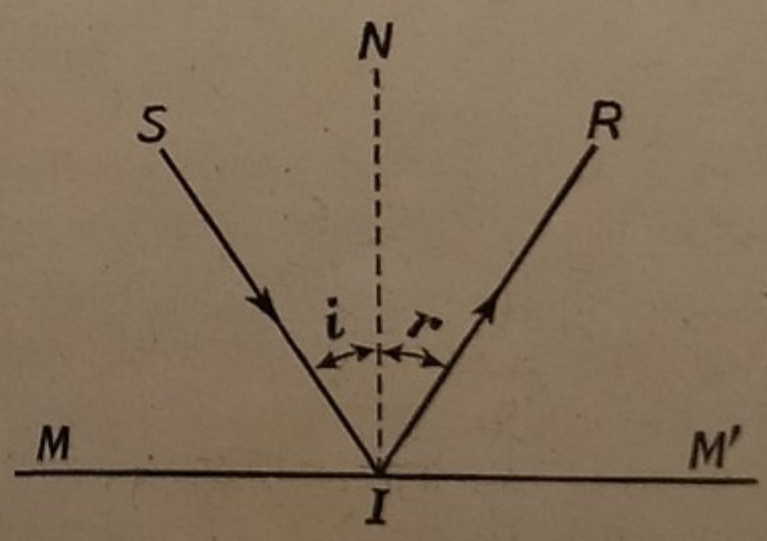


Fig. 16.

Sia MM' la sezione di uno *specchio piano*, (Fig. 16). Sia SI un raggio di luce, che cade in I sullo specchio; esso si chiama *raggio incidente* ed I *punto di incidenza.* Consideriamo in I la perpendicolare IN al piano dello specchio; si chiama la *normale nel punto d'incidenza.* L'angolo $SIN = i$ formato dal raggio incidente con la normale nel punto d'incidenza, si chiama *angolo d'incidenza*; esso può variare da 0°, allorchè il raggio batte nella direzione NI, sino a 90° se viene lambendo lo specchio nella direzione MI.

Sia IR il raggio rimandato dallo specchio; si chiama *raggio riflesso*; l'angolo $RIN = r$ formato con la medesima normale, si chiama *angolo di riflessione*; anche questo può variare da 0° a 90°.

Le leggi della riflessione stabiliscono una relazione tra le direzioni del raggio incidente e del raggio riflesso; cioè, dato il raggio incidente, permettono di individuare il raggio riflesso. Esse sono due:

1. *L'angolo di riflessione è uguale all'angolo d'incidenza* **(legge di Cartesio)**,

2. *Il raggio incidente, il raggio riflesso e la normale nel punto d'incidenza, giacciono nel medesimo piano*, che si chiama *il piano d'incidenza*.

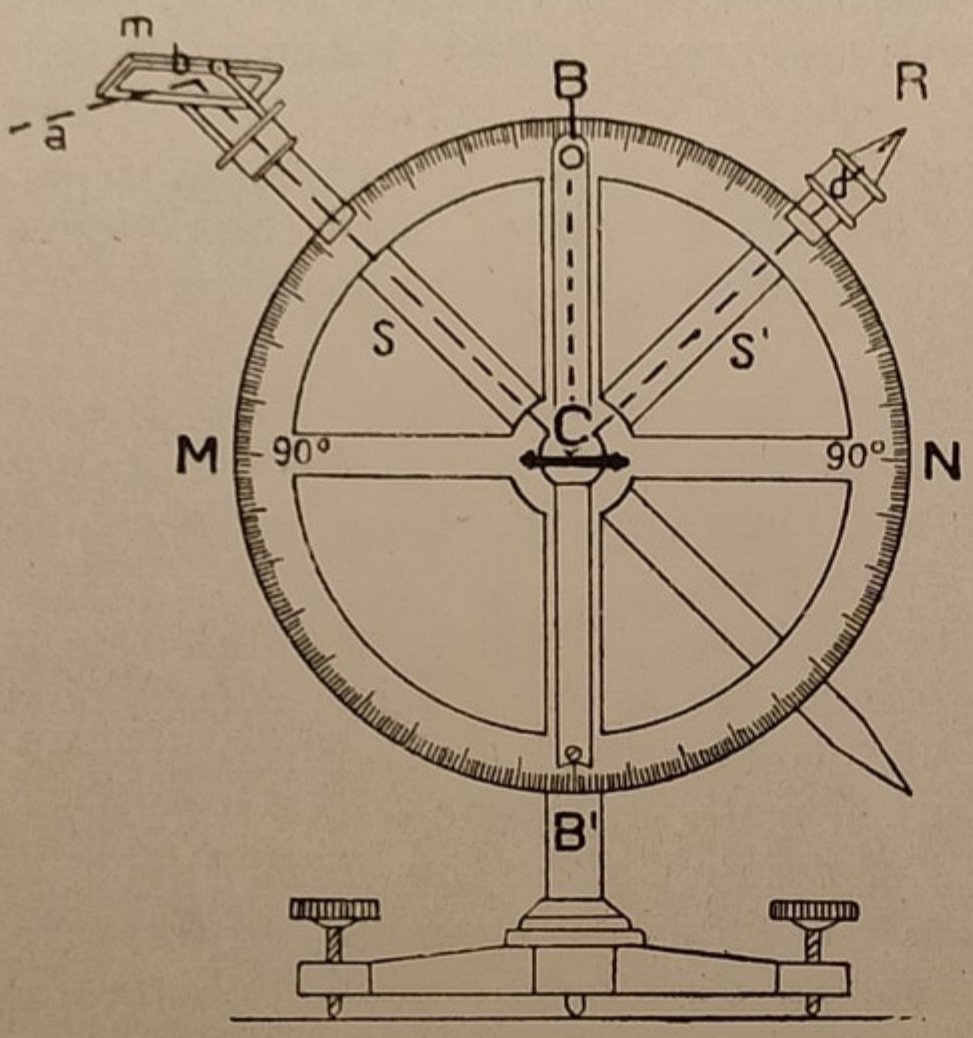


Fig. 17.

La verifica sperimentale di queste leggi, si fa con l'apparecchio della Fig. 17. Esso è composto di un cerchio di ottone MN, in un piano verticale, diviso in gradi. Al suo centro è disposto uno specchietto C orizzontale; cioè la normale CB dal centro di questo, è parallela al diametro che passa per lo zero del cerchio graduato. Attorno al centro del cerchio può ruotare una asticella S, chiamata *alidada*, che sostiene all'estremità uno specchietto m girevole in tutti i sensi, allo scopo di riflettere sul centro di C un fascio di raggi, provenienti o dal sole o da una lampada. Questi raggi bC sono i raggi incidenti: l'angolo bCB letto sul cerchio graduato, è l'angolo di incidenza; nella figura è di 45°. I raggi riflessi da C sono raccolti al centro di un piccolo schermo R, portato da un'altra alidada S', anch'essa spostabile; l'angolo BCR è l'angolo di riflessione. Comunque si sposti l'alidada S, si osserva che per raccogliere la luce riflessa da C, occorre spostare anche l'alidada S', in modo che i due angoli bCB e BCR siano sempre eguali.

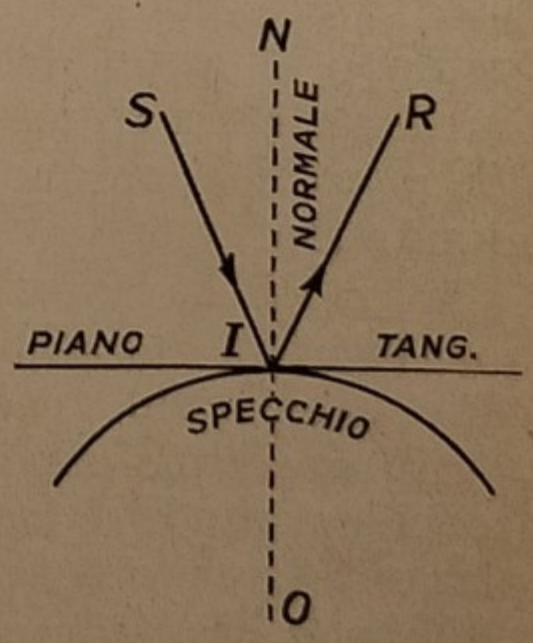


Fig. 18.

La 2ª legge è verificata implicitamente dal fatto che i raggi bC–CB–CR giacciono su uno stesso piano verticale, parallelo a quello del cerchio graduato.

Le leggi della riflessione valgono qualunque sia la forma dello specchio. Se esso è curvo (Fig. 18), per normale nel punto d'incidenza I si deve intendere la perpendicolare NI al piano tangente allo specchio nel punto di incidenza. Cioè, rispetto al raggio SI lo specchio agisce come se fosse ridotto ad un piccolo pezzo piano, che comprende il punto I, coincidente col piano tangente. Se lo specchio è sferico, la normale in I è la congiungente tal punto d'incidenza col centro O della sfera.

Specchi piani.

13. **Immagine virtuale.** — Sia AB (Fig. 19) la sezione di uno specchio piano, ed S un punto luminoso. Siano SI, SI'.... alcuni fra gli infiniti raggi partenti da S; essi si riflettono secondo la legge della riflessione nelle direzioni IR, $I'R'$.... Tutti questi raggi riflessi formano un fascio divergente; ma l'occhio li riceve come se provenissero da S' punto d'incontro dei loro prolungamenti. L'occhio dunque *vede* in S' un punto luminoso, eguale ad S, che *realmente* non esiste; si chiama **immagine virtuale** *di* S.

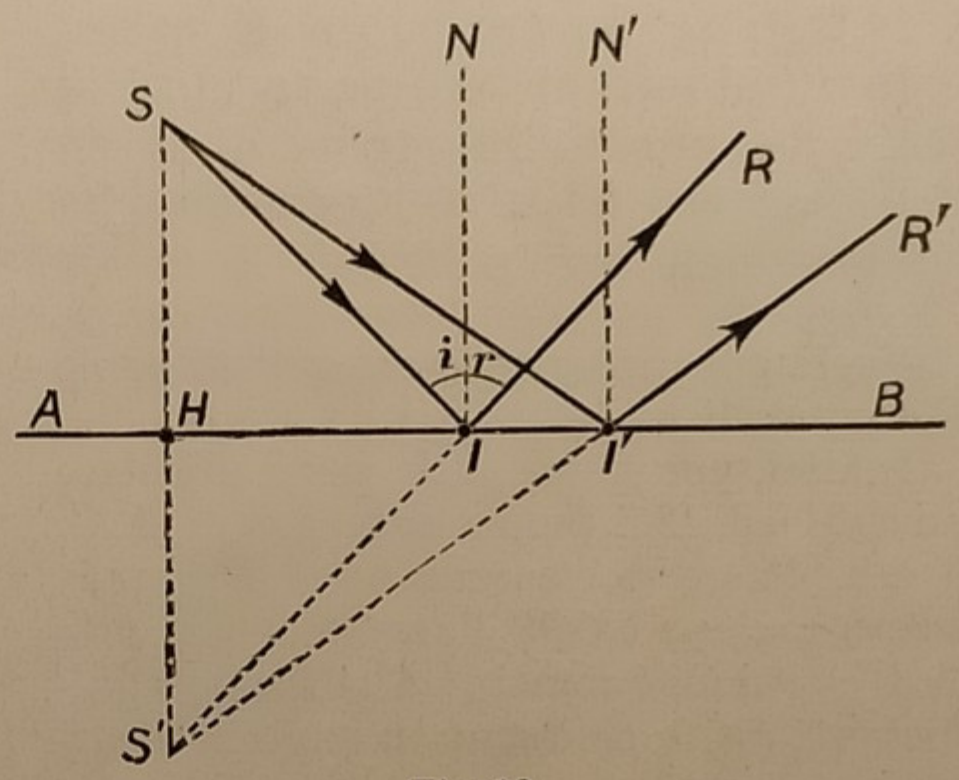


Fig. 19.

Quest'*immagine è simmetrica ad* S *rispetto al piano dello specchio*; cioè si trova sulla perpendicolare calata da S allo specchio, dall'altra parte, ad una distanza dallo specchio eguale a quella del punto S.

Infatti: S' è sulla perpendicolare allo specchio, perchè fra tutti i raggi incidenti vi è anche il raggio SH normale allo specchio; per questo raggio l'angolo d'incidenza è zero, quindi è pure zero l'angolo di riflessione; cioè il raggio si riflette su sè stesso e l'immagine dovendo trovarsi sul prolungamento di *tutti* i raggi riflessi, sarà sul prolungamento di SH.

Si confrontino poi i due triangoli rettangoli SHI ed $S'HI$; essi hanno il cateto HI in comune; poi l'angolo SIH è il complemento di i e l'angolo $S'IH$ è il complemento dell'opposto vertice di $r = i$; quindi è: $\widehat{SIH} = \widehat{S'IH}$. I due triangoli sono perciò eguali, ed avranno eguali gli altri elementi; cioè:

$$SH = S'H; \qquad c.\,d.\,d.$$

14. **Immagine di un oggetto.** — In base al teorema precedente, è facile trovare graficamente l'immagine di qualunque punto luminoso; basta calare dal punto dato la perpendicolare allo specchio e prolungarla dall'altra parte di un segmento eguale; l'estremo di tal segmento è l'immagine cercata.

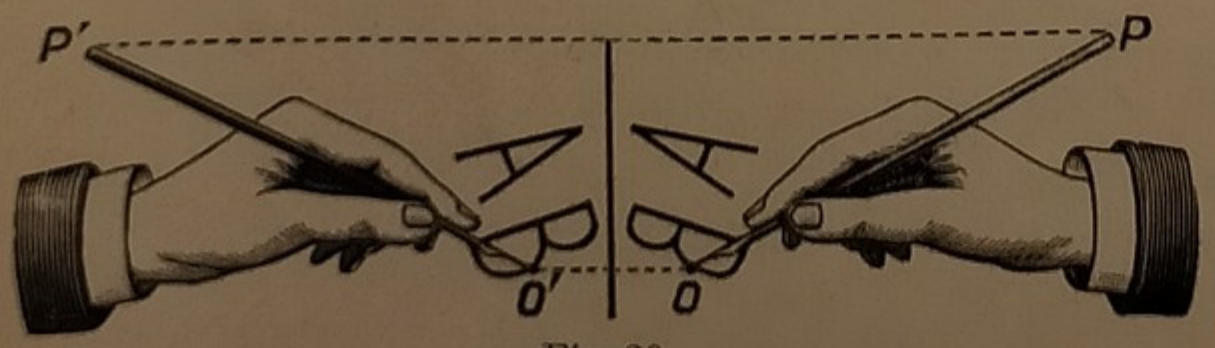


Fig. 20.

L'immagine di un oggetto è la totalità delle immagini di tutti i suoi punti; la regola precedente permette pertanto di trovare punto per punto, l'immagine di un oggetto. Applicandola al caso della Fig. 20, troveremo che anche in questo caso l'*immagine è simmetrica all'oggetto*. La simmetria però non è l'eguaglianza diretta; l'immagine risulta

ribaltata, cioè rovesciata in un senso, come riscontriamo con l'esperienza giornaliera, (Fig. 21). Così, guardando la scrittura in uno specchio, non si leggono i caratteri, che appaiono rovesciati; mentre ponendo avanti allo specchio la carta asciugante, in cui sia rimasta l'impronta di uno scritto, questo appare raddrizzato e si legge facilmente nell'immagine.

Fig. 21.

15. **Rotazione dello specchio.** — Sia A un punto luminoso, ed A' la sua immagine su uno specchio OM (Fig. 22); se questo ruota di un angolo α (minore di 90°) portandosi in OM', la nuova immagine di A su OM' sarà in A''; cioè l'immagine ha ruotato dell'angolo $A'OA''$.

Vogliamo dimostrare che quest'angolo è doppio di α.

Infatti, per essere AA' perpendicolare ad OM ed H il punto di mezzo di AA', è OM l'asse del segmento AA'; per la stessa ragione è OM' l'asse del segmento AA''; quindi i punti $AA'A''$ sono equidistanti da O; cioè sono su una stessa circonferenza di centro O. Ma allora $A'\widehat{A}A''$ è un angolo alla circonferenza che insiste sull'arco $A'A''$ ed $A'\widehat{O}A''$ è l'angolo al centro corrispondente; sappiamo dalla Geometria che:

$$A'\widehat{O}A'' = 2A'\widehat{A}A'';$$

ma: $A'\widehat{A}A'' = \alpha$ per avere i lati perpendicolari ed essere entrambi acuti, quindi:

$$A'\widehat{O}A'' = 2\alpha; \qquad c.\,d.\,d.$$

Concludendo:

Se lo specchio ruota di un certo angolo, l'immagine ruota di un angolo doppio.

Applicheremo in seguito questo teorema, per la misura delle piccole deviazioni, negli apparecchi di misura elettrici, (§ 304).

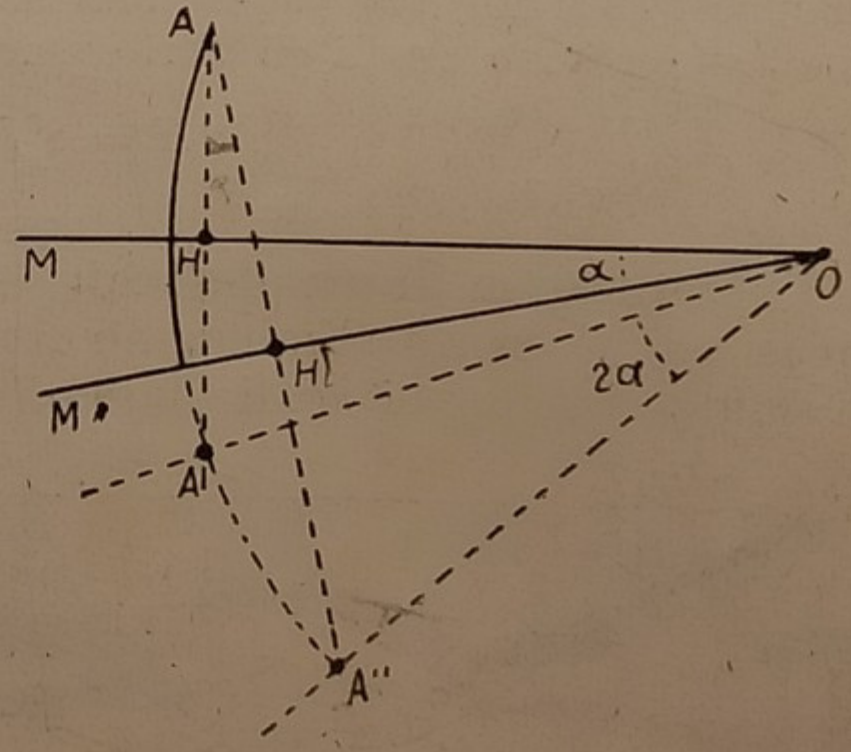


Fig. 22.

Problema. — *Una scintilla elettrica, della durata di $^1/_{20\,000\,000}$ di secondo, scocca a m. 5 da uno specchio girante con la velocità di 800 giri al secondo. Quale sarà la lunghezza della striscia formata dalla sua immagine nello specchio girante?*

Soluzione. — In $^1/_{800}$ di secondo lo specchio compie un giro intero, cioè 360°. L'angolo α di cui ruota lo specchio in $^1/_{20\,000\,000}$ di s., si ricava con la proporzione:

$$^1/_{800} : 360° = {}^1/_{20\,000\,000} : \alpha; \qquad \text{da cui:}$$

$$\alpha = \frac{^1/_{20\,000\,000} \times 360°}{^1/_{800}} = \frac{800 \times 360°}{20\,000\,000} = 0°,0144.$$

L'immagine ruota di $2\alpha = 0°,0288$. La striscia dell'immagine avrà la lunghezza x dell'arco che corrisponde all'angolo al centro 2α, su una circonferenza del raggio di m. 5. La lunghezza di tale circonferenza è:

$$c = \text{m. } (5 \times 2\pi) = \text{m. } 31,4; \quad \text{quindi } x \text{ si ricava con la proporzione:}$$

$$360° : 31,4 = 0°,0288 : x; \qquad \text{da cui:} \qquad x = \text{m. } \frac{31,4 \times 0,0288}{360} = \textbf{mm. 2,51.}$$

16. **Specchi ad angolo.** — Se un oggetto è posto fra due specchi formanti angolo fra loro, le immagini ottenute non sono soltanto due, cioè una per specchio; ma per le successive riflessioni da uno specchio all'altro si formano nuove immagini.

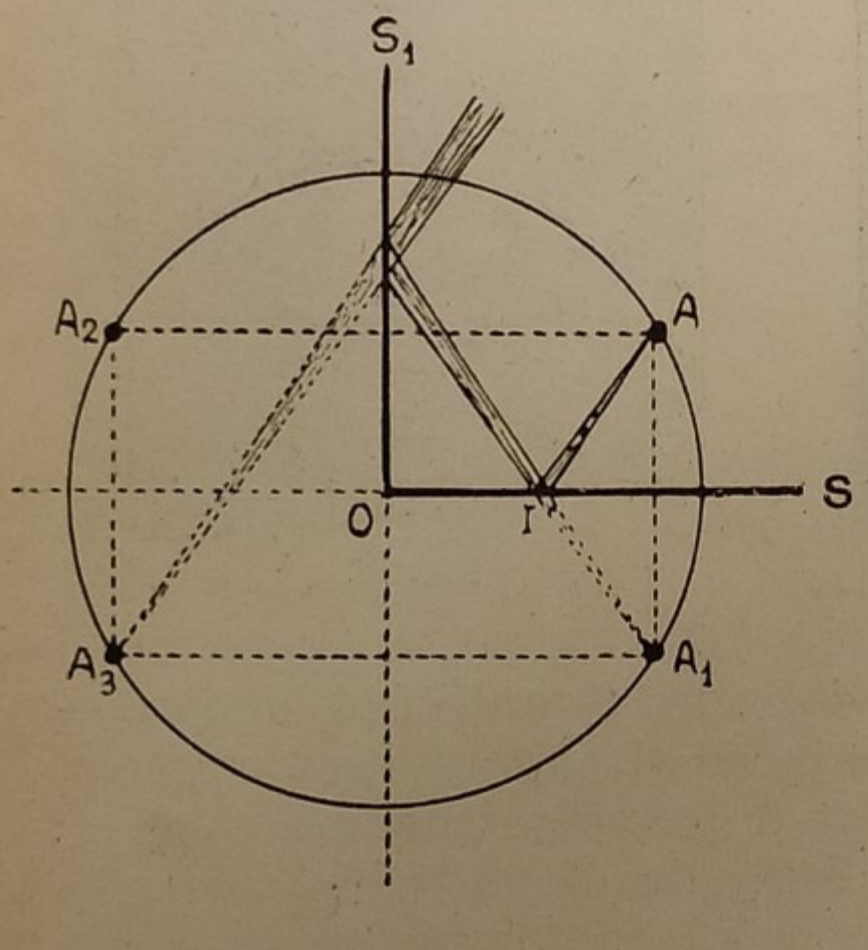


Fig. 23.

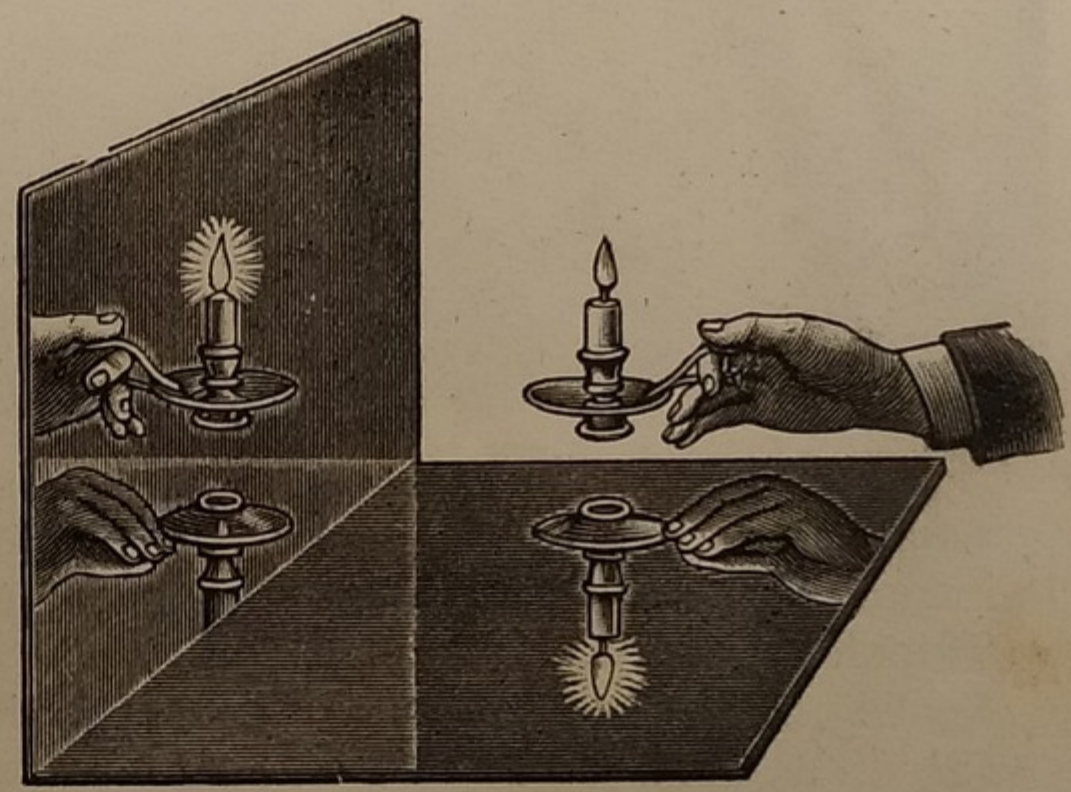


Fig. 24.

Sia, ad es., un punto luminoso A posto fra due specchi OS ed OS_1 (in sezione normale), fra loro perpendicolari, (Fig. 23). A si riflette su OS e forma, con la nota regola della simmetria, l'immagine A_1; ma si riflette anche su OS_1 e forma un'altra immagine A_2. Ora A_1 agisce come se fosse un punto realmente esistente e posto avanti allo specchio OS_1; infatti i raggi AI si riflettono su OS e battono su OS_1 come se provenissero da A_1; quindi si formerà una nuova immagine A_3 simmetrica di A_1 rispetto ad OS_1. Parimenti A_2 si riflette su OS; se l'angolo S_1OS è esattamente di 90°, l'immagine di A_2 e l'immagine di A_1 si sovrappongono in una sola immagine A_3. Si ottengono allora quattro immagini equidistanti da O, cioè su un cerchio di centro O e raggio OA; si noti che 4 è il quoziente di 360° : 90°. Generalizzando: *Un punto luminoso fra due specchi ad angolo, forma tante immagini, compreso il punto, quant'è il quoziente fra 360° e l'ampiezza*

dell'angolo degli specchi; tutte giacenti in un piano perpendicolare all'intersezione dei due specchi, su una circonferenza contenente il punto dato, e avente il centro sull'intersezione dei due specchi.

La Fig. 24 mostra la verifica sperimentale.

17. **Specchi paralleli - Immagini multiple.** — Nel caso particolare in cui l'angolo degli specchi è zero, cioè gli specchi sono paralleli, le immagini diventano 360 : 0; a questo quoziente che non ha significato nell'algebra elementare, si attribuisce un valore infinito; quindi in questo caso

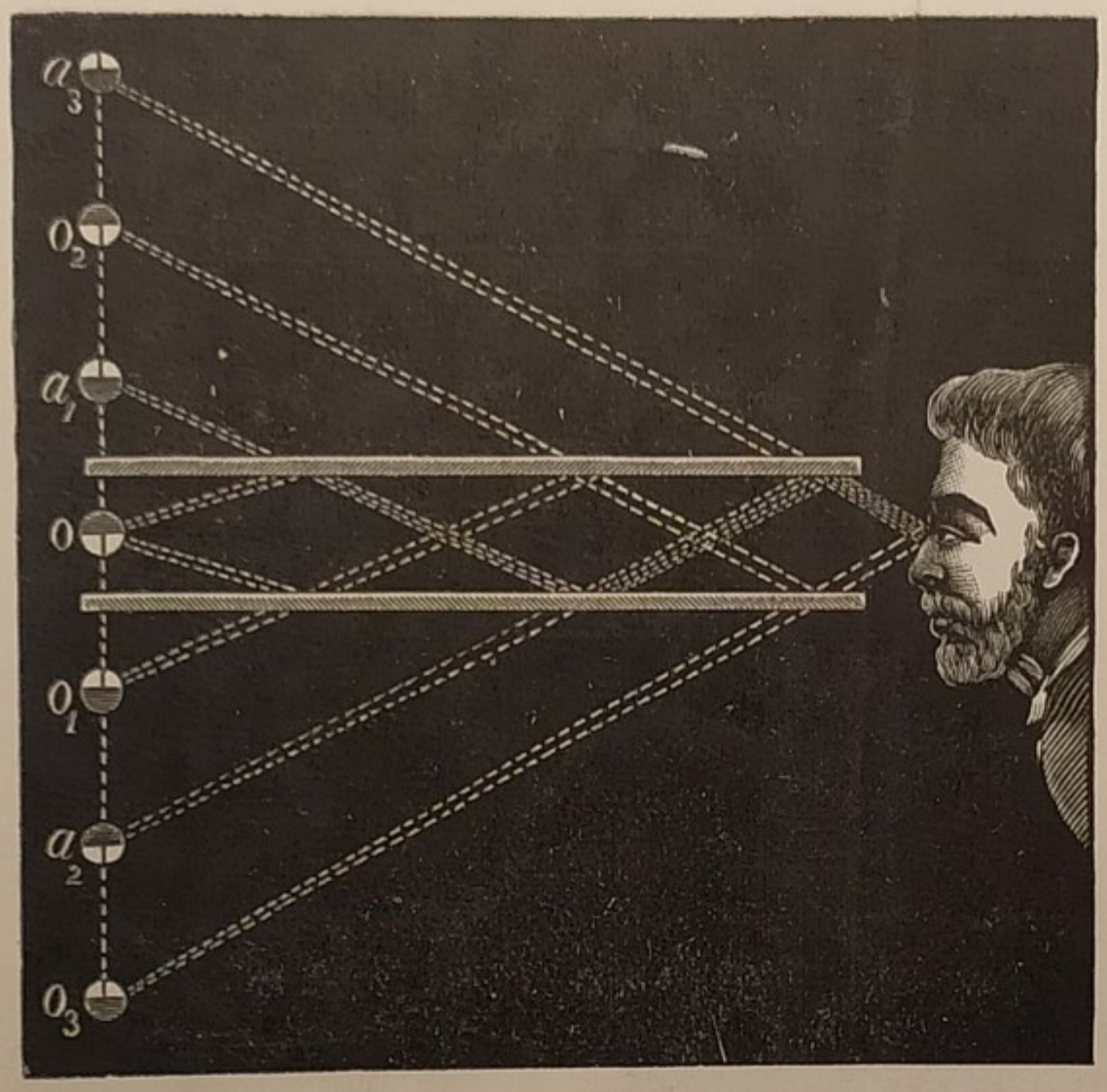


Fig. 25.

Fig. 26.

le immagini sono (teoricamente) un numero infinito; e sono tutte sulla perpendicolare comune condotta dal punto luminoso ai piani dei due specchi.

La Fig. 25 spiega il modo di formarsi di due di queste immagini: a_3 ed o_3.

Ciò si osserva in alcune sale di parrucchieri o in alcuni caffè, ove una persona posta fra due specchi su pareti opposte, scorge una lunga fila di immagini estendersi a vista d'occhio. In pratica le immagini non sono in numero illimitato; non essendo la riflessione della luce totale, un certo numero di raggi vengono ad estinguersi ad ogni nuova riflessione. Le immagini quindi vanno oscurandosi sempre più, sino a non scorgersi più.

In modo analogo si spiega la formazione delle **immagini multiple** in uno specchio comune di vetro; guardando *di fianco* l'immagine di una fiamma, si osserva un'immagine brillante *preceduta* da un'immagine più sbiadita, e *seguita* da una serie di immagini che vanno sempre più oscurandosi, fino ad estinguersi, (Fig. 26).

La spiegazione di tal fenomeno è la seguente: in pratica gli specchi sono formati da una lastra di vetro, di un certo spessore, argentata sulla faccia posteriore. Le superfici riflettenti in questo caso sono le due facce della lastra, che possono considerarsi come due specchi paralleli. Consideriamo un fascio di raggi AI, partenti da un punto luminoso A (Fig. 27); esso subisce una prima riflessione sulla faccia anteriore S della lastra, e si forma

una prima immagine A_1; poco chiara, perchè è piccola la percentuale dei raggi riflessi dal vetro trasparente. La quasi totalità dei raggi penetra nel vetro, e forma il fascio II_1, che si riflette sulla faccia argentata S_1 secondo I_1I_2 ed esce quasi integralmente da S, formando la 2ª immagine A_2 molto brillante. Ma in I_2 una piccola parte dei raggi è riflessa secondo I_2I_3, riflessa nuovamente in I_3 ed esce da I_4, formando una 3ª immagine A_3 poco luminosa; e così via si formano nuove immagini A_4... da successive riflessioni tra le due facce; però sempre più oscure perchè va sempre diminuendo il numero dei raggi ad ogni nuova riflessione. Si ottengono così l'immagine A_2 brillante; davanti la A_1 meno luminosa, e dietro le altre degradanti, come già s'era detto.

Le immagini multiple sono causa di diminuzione di nitidezza delle immagini ottenute con gli specchi comuni, onde questi sono da evitare nella costruzione degli strumenti d'ottica.

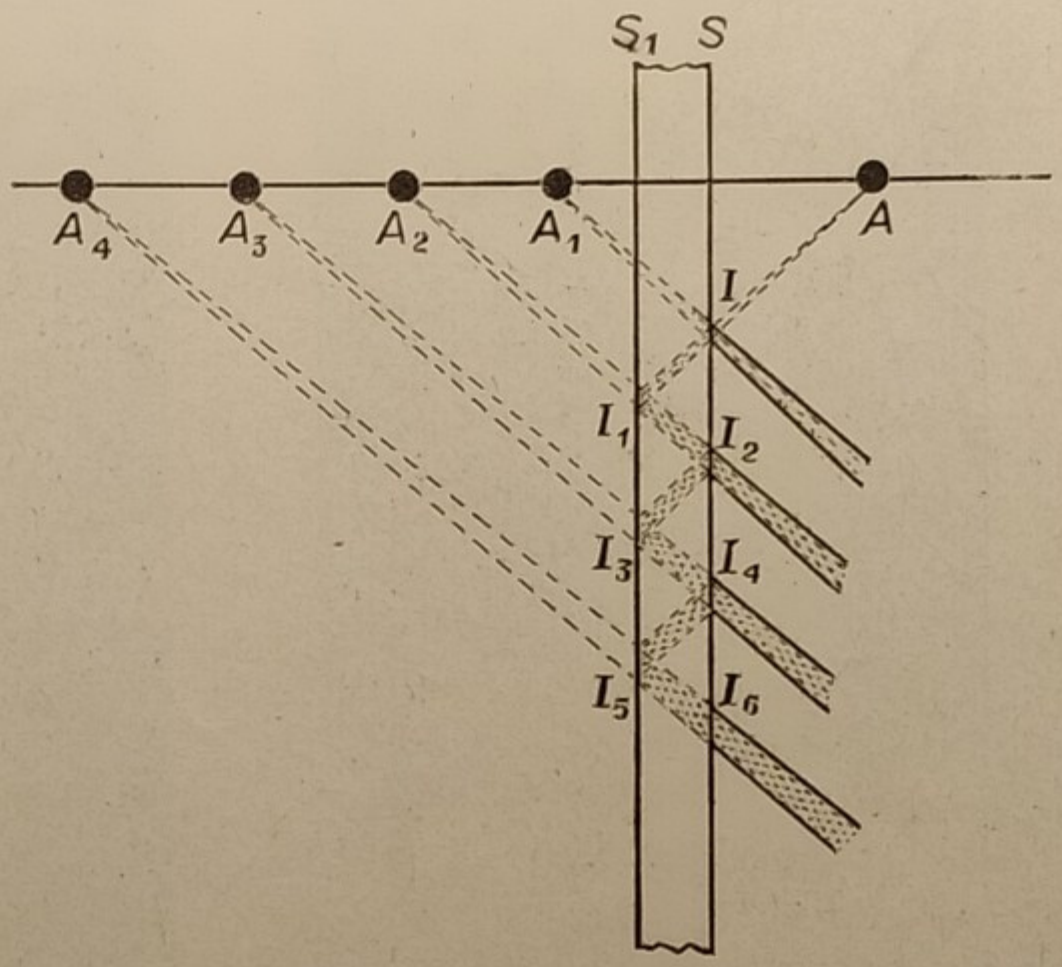


Fig. 27.

18. **Applicazioni degli specchi piani.** — Gli specchi piani hanno avuto numerose applicazioni, oltre quella comune giornaliera di guardarsi allo specchio.

Ponendo uno specchietto piano nella retrobocca e inclinandolo opportunamente, se vi si dirige un fascio di raggi, essi vanno ad illuminare la laringe; il medico può allora osservarne comodamente l'immagine riflessa dallo stesso specchietto; l'apparecchio si chiama il **laringoscopio.**

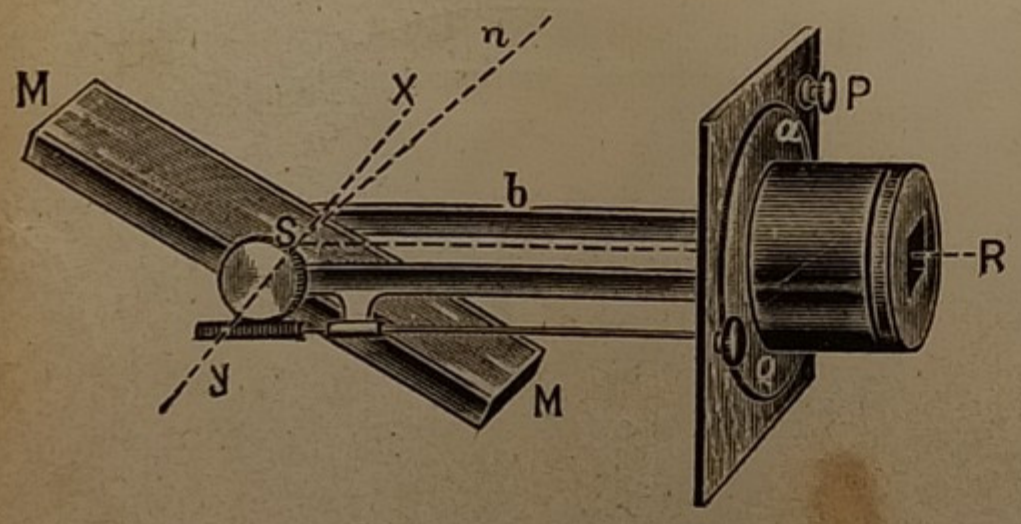


Fig. 28.

Il **portaluce** è uno specchio rettangolare MM, che può ruotare attorno a due assi XY ed SR tra loro perpendicolari, in modo che il suo piano può assumere qualunque inclinazione nello spazio, (Fig. 28). Si applica sulla imposta di una finestra, in modo che sporga all'esterno, e vi batta il sole; manovrando dall'interno le viti P e Q, si dà un'inclinazione tale allo specchio, che esso rifletta i raggi del sole nella direzione SR e li diriga ove si debbano utilizzare.

Due specchi sono posti tra la gamba anteriore e ciascuna delle gambe posteriori di un piccolo tavolo a tre piedi; in modo che questi facendo da cornice nascondano gli orli degli specchi, che così non si vedono. Essi coprono

un uomo dal collo in giù, la cui testa sporge dal piano del tavolo, (Fig. 29); il tutto è collocato in una piccola stanza, tappezzata a tinta unita. Le pareti laterali riflettendosi su tali specchi, dànno l'illusione di scorgere dietro il tavolo la parete di fondo,

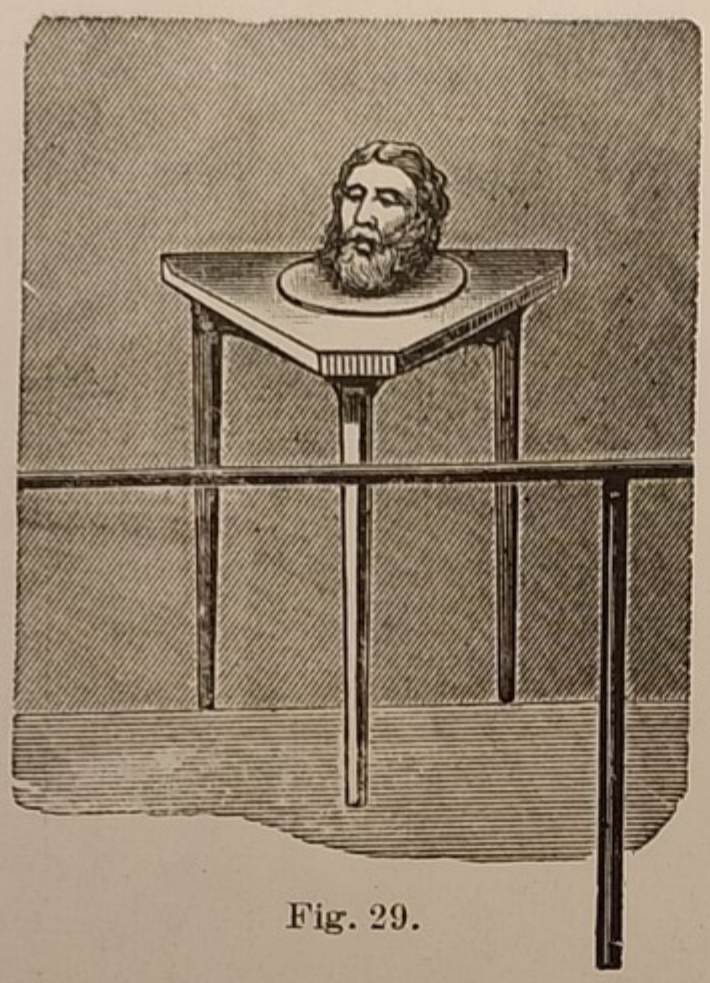


Fig. 29.

e cioè che il tavolo sia vuoto; si produce così il noto giuoco della **testa parlante.**

Una figura *P* fortemente illuminata da una lanterna *L* (Fig. 30), posta sotto al palcoscenico di un

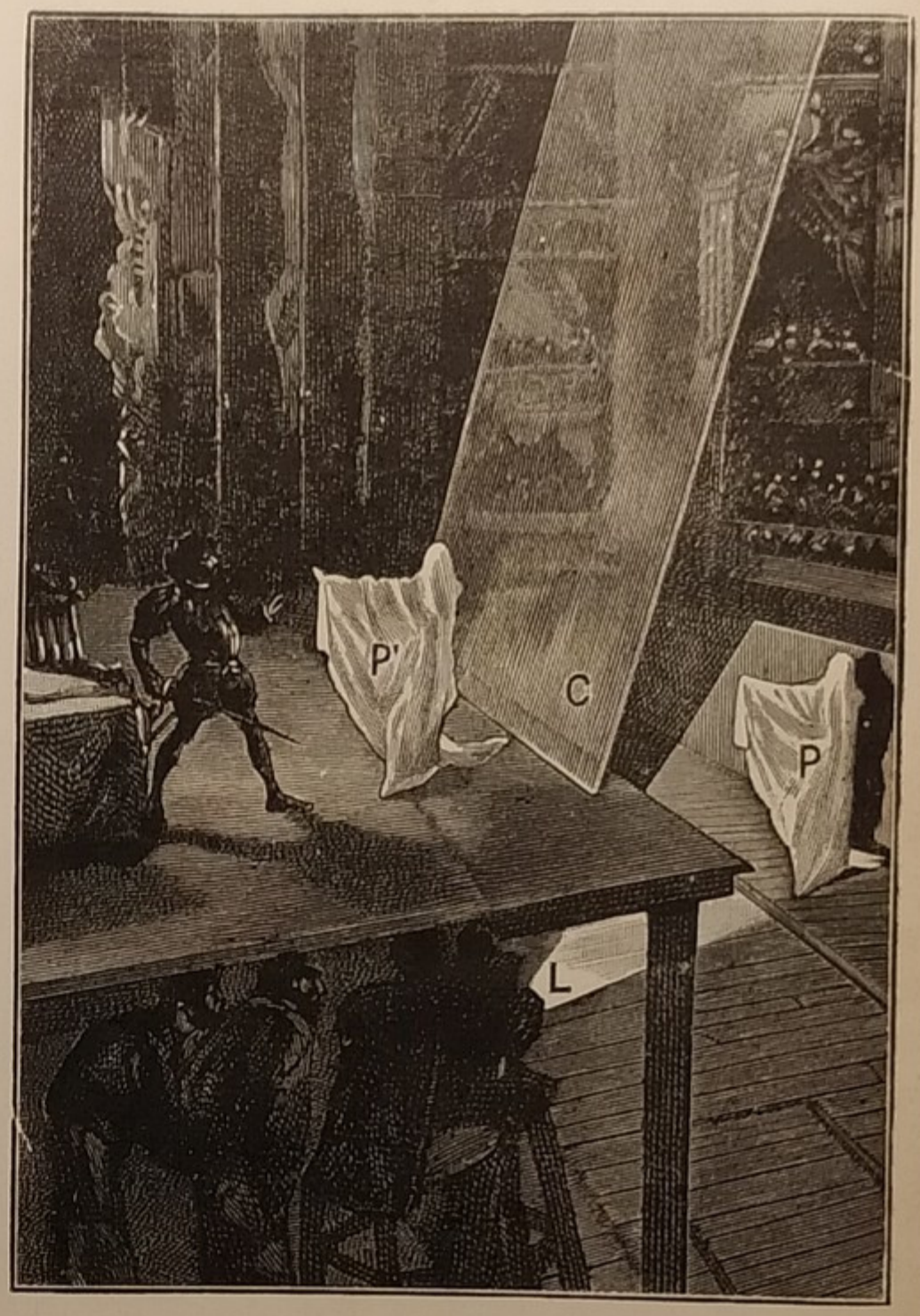


Fig. 30.

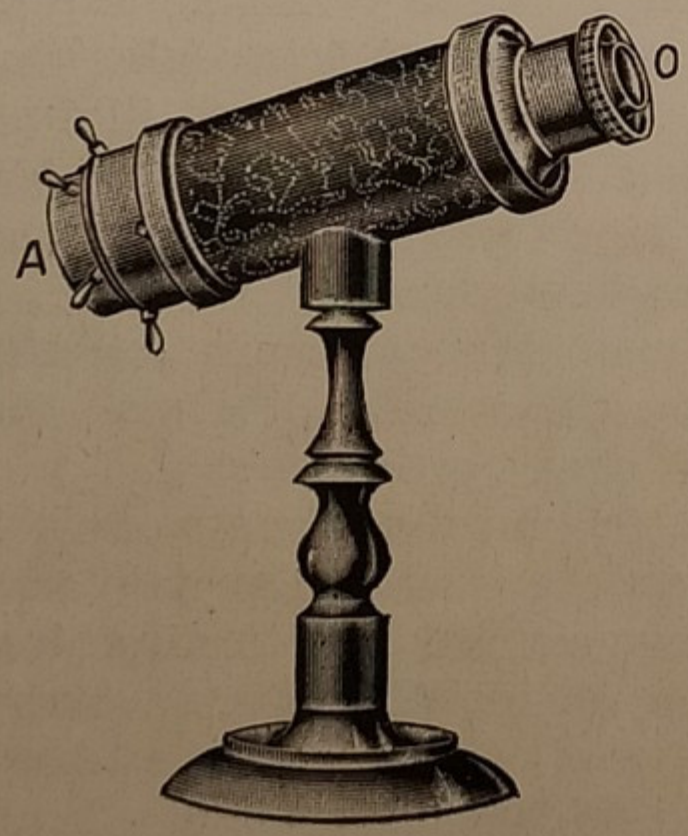


Fig. 31.

Fig. 32.

teatro, e quindi invisibile al pubblico, è vista da questo riflessa su una grande lastra di cristallo *C*, i cui orli sono nascosti dai panneggi della scena, ed opportunamente inclinata; attraverso di essa si vedono egual-

mente gli oggetti e le persone della scena. L'immagine P' appare evanescente e immateriale, come se fosse trasparente, e dà l'illusione completa della *comparsa di uno spettro*.

Il **caleidoscopio** (Fig. 31) è un tubo di cartone o di metallo, dentro cui sono disposte due strisce rettangolari di specchio, inclinate in modo che la loro intersezione sia su una generatrice del tubo, e formino un angolo di 60°. Ad un estremo A del tubo si trovano dei frammenti di vetro colorato, posti fra due dischi di vetro ordinario. Guardando dall'altra estremità O fra i due specchi, si vede la parte dei frammenti di vetro compresi fra questi, ed altre 5 immagini simmetriche di essi; in modo che tutto formi una figura regolare, di gradevole aspetto, (Fig. 32). Scotendo o girando la parte A del tubo, si modifica la disposizione dei pezzetti di vetro fra i due specchi, e varia continuamente la figura ottenuta.

Problemi da risolvere.

1. Come bisogna disporre due specchi tra loro perpendicolari, riflettenti dalla parte dell'angolo concavo, perchè di due punti luminosi distanti 40 cm. tra di loro si formi un'unica immagine, equidistante dai due specchi?

2. Un oggetto è posto su un cerchio orizzontale, che può ruotare sul suo asse. Uno specchio piano è posto a 45° col piano del cerchio; dove si forma l'immagine dell'oggetto e che avviene di essa, se il cerchio compie un giro sul suo asse?

3. Un punto luminoso A giace sul piano bisettore del diedro formato da due specchi, il cui angolo è di 60°, e la sua distanza dallo spigolo è cm. 15. Calcolare la distanza delle prime due immagini, formate dai due specchi.

4. Un punto luminoso dista cm. 30 da uno specchio e cm. 40 da un altro parallelo al primo. A quale distanza tra di loro si trovano le terze immagini di ciascuno specchio?

5. In che posizione si deve collocare un punto luminoso, fra due specchi a 60°, perchè le sue immagini siano equidistanti dagli specchi, a 30 cm. di distanza tra di loro?

6. Un punto luminoso A si trova sul piano bisettore del diedro formato da due specchi, il cui angolo è di 45°, e la sua distanza da ciascuno specchio è di cm. 10. Calcolare la distanza delle prime due immagini formate dai due specchi.

Specchi sferici.

19. **Specchi curvi.** — Si ottengono risultati assai diversi e più interessanti, quando la luce si riflette su uno specchio curvo. Tra gli specchi curvi studieremo solo gli **specchi sferici**; cioè quelli la cui superficie riflettente è una porzione di sfera (una *calotta*, Fig. 33). Si chiamano *concavi* o *convessi*, a secondo che essi riflettono dalla parte concava o da quella convessa. Cominciamo lo studio degli specchi concavi.

20. **Specchi sferici concavi.** — Sia MN la sezione della calotta speculare (Fig. 34), ottenuta con un piano diametrale passante per il *vertice* V della calotta. Il centro C della sfera di cui fa parte la calotta, si chiama il *centro di curvatura*; la retta VC che congiunge questi due punti è l'*asse*

principale; ogni altra retta passante per C è un *asse secondario*; l'angolo MCN si chiama *apertura dello specchio*.

Sia A (Fig. 35) un punto luminoso su l'asse principale; un raggio AI, fra gli infiniti partenti da A, si riflette con la nota legge della riflessione, osservando che la normale nel punto d'incidenza I è il raggio IC della sfera di cui fa parte lo specchio. Il raggio riflesso incontra l'asse principale in un punto A_1. Nel triangolo A_1IA la IC è la bisettrice dell'angolo in I; per un noto teorema di Geometria (il teorema della bisettrice) è:

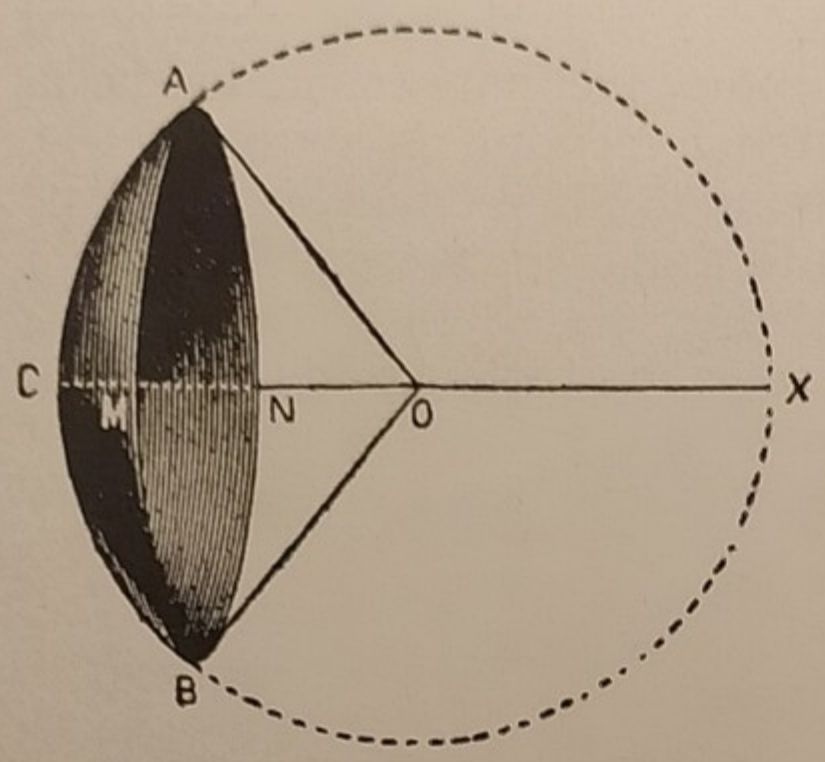


Fig. 33.

$$1) \qquad AI : A_1I = AC : A_1C.$$

Essendo AC costante per tutti i raggi partenti da A, mentre AI è variabile da raggio a raggio, devono essere variabili anche A_1I e A_1C; cioè: gli infiniti raggi partenti da A dopo la riflessione non s'incontrano in uno stesso punto; ma

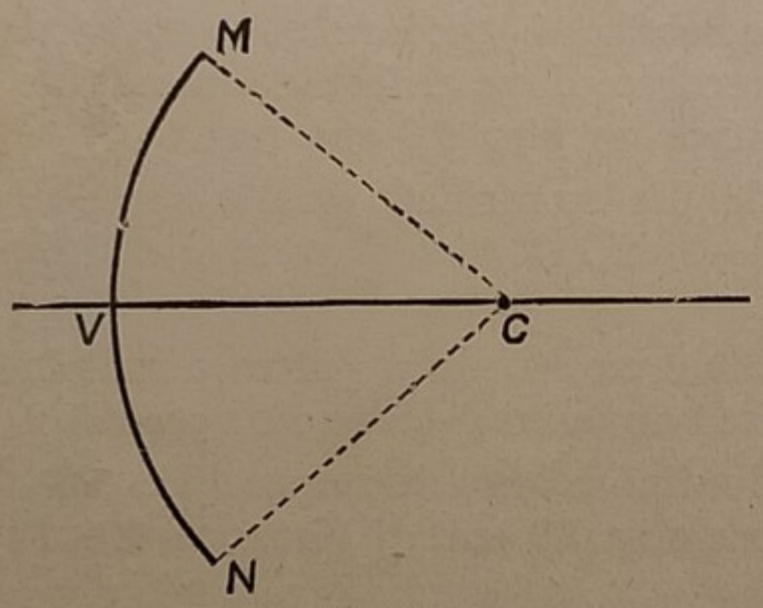


Fig. 34.

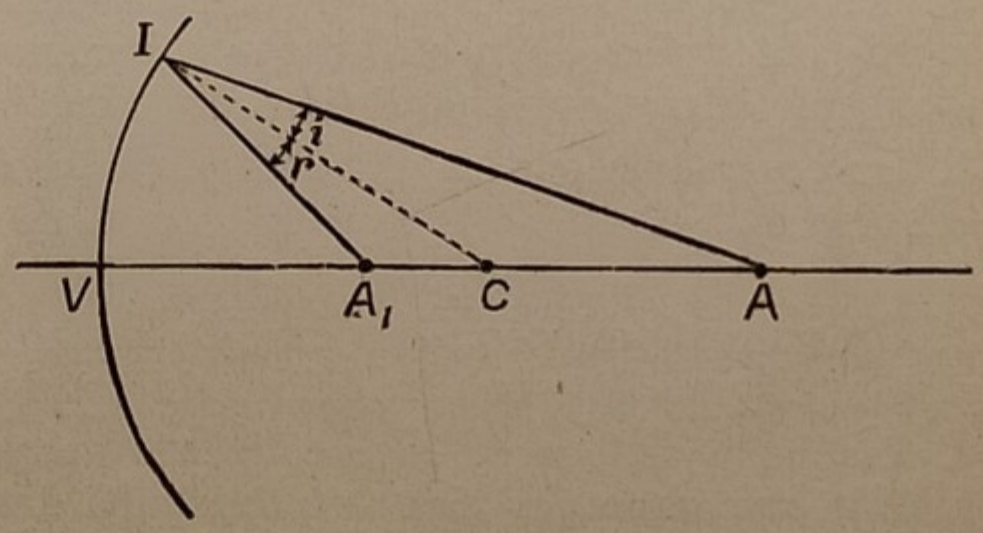


Fig. 35.

si incontrano due a due in punti diversi, involgendo una superficie che si chiama *caustica di riflessione* o *catacaustica*, (Fig. 36).

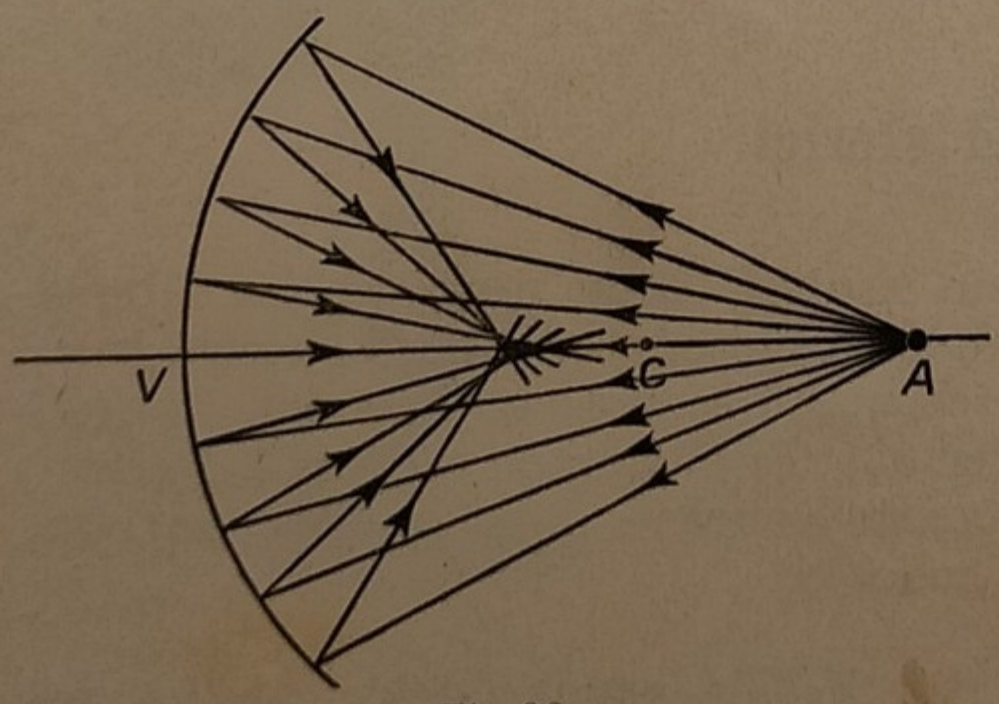


Fig. 36.

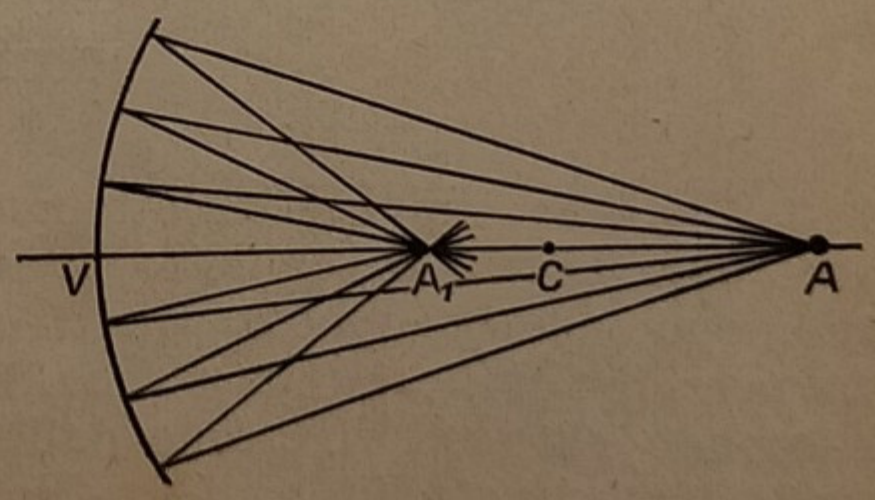


Fig. 37.

Se però *lo specchio è di piccola apertura*, AI si può considerare costante per tutti i raggi, ed eguale ad AV; anche A_1I allora è sensibilmente costante

ed eguale ad A_1V; cioè tutti i raggi riflessi s'incontrano sensibilmente nello stesso punto A_1 (Fig. 37), giacente anch'esso sull'asse principale. Infatti, tra i raggi partenti da A vi è anche l'asse principale AV, il quale cadendo sullo specchio nella direzione della normale, si riflette su sè stesso, e dovrà passare anch'esso per A_1. Questo punto si chiama l'**immagine** del punto A; i due punti A ed A_1 si chiamano i **punti coniugati.** Concludendo:

se lo specchio è di piccola apertura, ad un fascio di raggi incidenti omocentrici (§ 3) *corrisponde un fascio di raggi riflessi pure omocentrici.*

21. **Formula dei punti coniugati.** — Sostituendo nella 1) ad AI ed A_1I rispettivamente AV ed A_1V, si ottiene:

2) $$AV : A_1V = AC : A_1C.$$ Poniamo:

$AV = p$; $A_1V = q$; $CV = r$; convenendo di considerare tali quantità positive se corrispondenti a segmenti giacenti dalla parte della superficie speculare dello specchio, negative se dalla parte non riflettente; sarà: $AC = p - r$; $A_1C = r - q$. Sostituendo nella 2): $p : q = (p - r) : (r - q)$; risolvendo:

3) $$p(r - q) = q(p - r);$$ sviluppando: $$pr - pq = pq - qr$$

o anche: $$qr + pr = 2pq;$$ e dividendo tutta l'equazione per pqr:

4) $$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{r}.$$

Questa relazione tra p, q ed r si chiama la *formula dei punti coniugati.* Essa serve, assegnata la posizione del punto luminoso A, a trovare la sua immagine A_1. Per questo si misura la distanza di A dallo specchio, e il numero trovato si sostituisce in luogo di p nella 4); si mette in luogo di r il numero (noto, se è dato lo specchio) che misura il raggio dello specchio; la 4) diventa allora un'equazione numerica di 1° grado rispetto all'incognita q, risolvendo la quale si trova il valore di q; questo, riportato sull'asse principale a partire da V, *avanti* allo specchio se è positivo, e *dietro* lo specchio se è negativo, determina la posizione dell'immagine A_1.

Esempio. — *Dove si trova l'immagine di un punto, posto a m. 4,20 da uno specchio concavo, il cui raggio è cm. 60?*

È in questo caso: $p = $ cm. 420 $r = $ cm. 60; sostituendo nella 4):

$$\frac{1}{420} + \frac{1}{q} = \frac{2}{60}, \quad \text{da cui:} \quad \frac{1}{q} = \frac{2}{60} - \frac{1}{420} = \frac{13}{420}; \quad \text{cioè:}$$

$$q = \text{cm.}\ \frac{420}{13} = \textbf{cm. 32,3.}$$

L'immagine dunque dista dallo specchio cm. 32,3.

22. **Fuoco.** — La 4) vale per qualunque posizione del punto luminoso A; vale quindi anche se A è infinitamente lontano. Facendo in essa $p = \infty$ e ponendo mente che $\frac{1}{\infty} = 0$, si ha:

$$\frac{1}{q} = \frac{2}{r}, \quad \text{e:} \quad q = \frac{r}{2}.$$

L'immagine adunque in questo caso è a metà del raggio. Se il punto A è all'infinito vuol dire che i raggi provenienti da esso sono paralleli all'asse principale; in questo caso pertanto i raggi riflessi s'incontrano nel punto F, posto a metà fra C e V, (Fig. 38). Questo punto si chiama il **fuoco principale.** I raggi riflessi s'incontrano *realmente* in tal punto; tanto che ponendo ivi un foglio di carta, vi vediamo disegnarsi un punto luminoso veramente esistente: quindi nello specchio concavo il *fuoco è reale.*

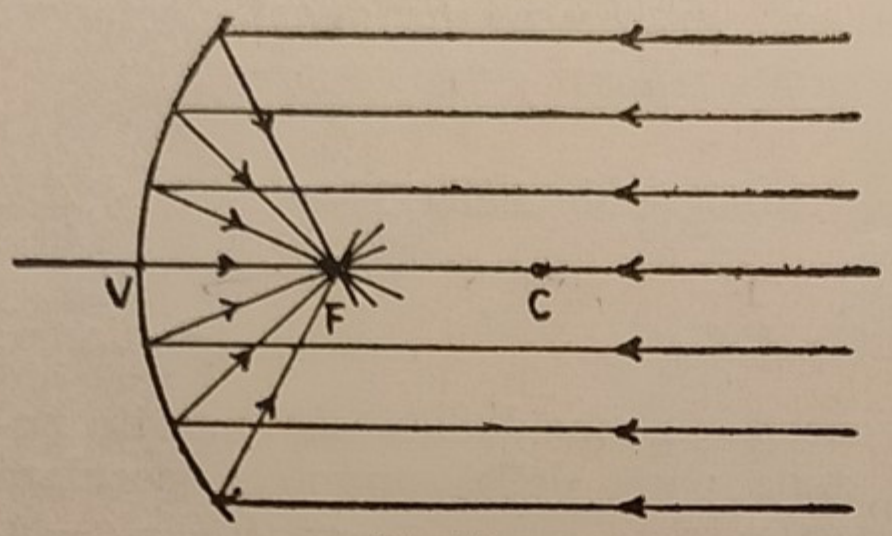


Fig. 38.

L'esperienza può farsi facendo cadere sullo specchio un fascio di raggi solari, che si possono ritenere praticamente paralleli; si vede con l'occhio il cono dei raggi riflessi, che ha il vertice sul fuoco. In questo punto convergono anche i raggi calorifici, onde vi può essere una temperatura elevata; tanto che ponendovi un fuscellino di legno esso piglia fuoco; da cui il suo nome. La leggenda vuole che in tal guisa Archimede, con grandi specchi concavi chiamati *specchi ustori*, abbia incendiato dalla riva le navi romane che assediavano Siracusa.

Chiamasi **distanza focale** la distanza FV dal fuoco allo specchio; s'indica con f. Per quanto si è ora dimostrato, è:

$$f = \frac{r}{2}, \qquad \text{e quindi:} \qquad \frac{1}{f} = \frac{2}{r}.$$

Sostituendo nella 4) si ha:

$$5) \qquad \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

che è la formula usuale dei punti coniugati. Essa dice che:

la somma delle inverse delle distanze del punto luminoso e della sua immagine dallo specchio, è uguale all'inversa della distanza focale.

23. **Posizione di un punto e della sua immagine.** — Dalla formula 5) dei punti coniugati, si possono ricavare algebricamente i limiti entro cui varia q, per i diversi valori di p compresi tra 0 e ∞.

Dalla definizione di fuoco, scaturisce senz'altro:

1. Se il punto luminoso è all'infinito, la sua immagine è sul fuoco.

Sia ora il punto luminoso tra l'infinito ed il centro di curvatura; cioè $p > 2f$. Sostituendo nella 5) si ricava:

$$\frac{1}{2f} + \frac{1}{q} > \frac{1}{f}; \quad \text{cioè:} \quad \frac{1}{q} > \frac{1}{f} - \frac{1}{2f}, \quad \text{o anche:} \quad \frac{1}{q} > \frac{1}{2f};$$

da cui: $q < 2f$; l'immagine è in tal caso tra il fuoco e il centro di curvatura, quindi:

2. Se il punto luminoso è tra l'infinito ed il centro di curvatura, l'immagine è tra il fuoco ed il centro di curvatura.

Per $p = 2f$, si ricava dalla 5):

$$\frac{1}{2f} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}, \quad \text{da cui:} \quad \frac{1}{q} = \frac{1}{2f} \quad \text{e:} \quad q = 2f. \quad \text{Cioè:}$$

3. Se il punto luminoso è sul centro di curvatura, anche l'immagine è sul centro di curvatura. Ciò si deduce anche direttamente; infatti tutti i raggi partenti da C cadono sullo specchio secondo le normali, e vengono perciò riflessi su sè stessi, incontrandosi nuovamente in C.

Sia ora il punto luminoso tra il centro di curvatura ed il fuoco; cioè $p < 2f$. Si ricava dalla 5):

$$\frac{1}{2f} + \frac{1}{q} < \frac{1}{f}, \quad \text{cioè:} \quad \frac{1}{q} < \frac{1}{2f}, \quad \text{e:} \quad q > 2f;$$

l'immagine in tal caso è tra il centro di curvatura e l'infinito. Quindi:

4. Se il punto luminoso è tra il centro di curvatura ed il fuoco, l'immagine è tra il centro di curvatura e l'infinito.

Questo caso, che è l'inverso del 2°, era facilmente intuibile, perchè la formula dei punti coniugati non varia, permutando p con q; cioè se di un punto luminoso A l'immagine è A_1, viceversa di un punto luminoso A_1 l'immagine è A. Ciò giustifica la denominazione di *punti coniugati.*

Esso è anche un caso particolare del **principio della reciprocità del cammino dei raggi luminosi,** che dice: *se un raggio luminoso* r *dopo aver attraversato diversi mezzi trasparenti in un certo senso, esce nella direzione* r′, *inversamente partendo dalla direzione* r′ *e attraversando in senso contrario i medesimi mezzi, torna indietro nella direzione primitiva* r.

In tutti questi casi l'immagine è reale, perchè esiste realmente, e può raccogliersi su uno schermo; essendo *formata dall'incontro effettivo dei raggi riflessi.*

Per $p = f$ si ricava dalla 5):

$$\frac{1}{f} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}, \quad \text{cioè:} \quad \frac{1}{q} = 0, \quad \text{e:} \quad q = \infty; \quad \text{ossia:}$$

5. Se il punto luminoso è sul fuoco, la sua immagine è all'infinito.

Cioè i raggi provenienti dal fuoco, si riflettono parallelamente all'asse principale. È il caso inverso del 1°.

Se $p < f$, sostituendo nella 5) si ricava:

$$\frac{1}{f} + \frac{1}{q} < \frac{1}{f}, \quad \text{cioè:} \quad \frac{1}{q} < 0, \quad \text{e:} \quad q < 0.$$

Avendo convenuto di riportare dalla stessa parte dello specchio i valori positivi di p e q, un valore negativo di q si deve riportare da parte opposta rispetto allo specchio (§ 21). Cioè i raggi riflessi sono divergenti e non s'incontrano; ma si incontrano i loro prolungamenti in un punto A_1 dietro lo specchio, (Fig. 39). Il punto A_1 non esiste realmente; ma l'occhio riceve i raggi riflessi dallo specchio come se provenissero da A_1, quindi *vede* in A_1 un punto luminoso, che è l'immagine *virtuale* di A. Quindi:

6. Se il punto luminoso è tra il fuoco e lo specchio, l'immagine è virtuale, dietro lo specchio.

Si noti la variazione con continuità fra le posizioni del punto luminoso e dell'immagine. Il punto luminoso parte dall'infinito e viene sino allo specchio; l'immagine parte dal fuoco e viene incontro al punto luminoso, si incontrano in C e si scambiano: il punto da C va verso il fuoco e l'immagine da C s'allontana verso l'infinito. Quando il punto luminoso raggiunge il fuoco, l'immagine è infinitamente lontana; ma appena il punto ha oltrepassato il fuoco verso lo specchio, l'immagine deve passare dietro lo specchio.

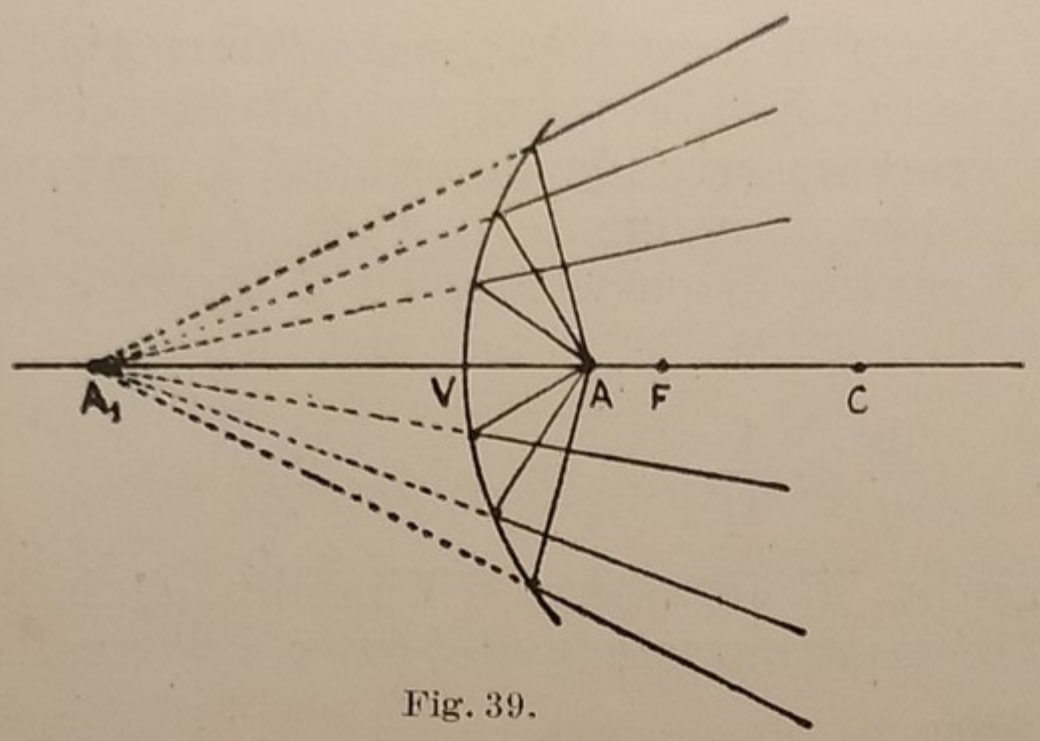


Fig. 39.

Ora, ad una variazione *continua* della posizione del punto, deve corrispondere una variazione *continua* della posizione dell'immagine; quindi al passaggio graduale del punto per il fuoco, deve corrispondere un passaggio *senza salti* dell'immagine, dall'estremità all'infinito dell'asse principale *avanti* lo specchio, all'altra estremità all'infinito del medesimo asse *dietro* lo specchio. Questi due punti all'infinito dell'asse principale devono pertanto coincidere; ciò si esprime dicendo che $+\infty$ e $-\infty$ sulla stessa retta, coincidono.

Risolvendo la 5) rispetto a q, si ottiene:

$$6) \qquad q = \frac{pf}{p-f} .$$

Facendo in essa $p = 0$, risulta: $q = 0$; cioè:

7. Se il punto luminoso è sullo specchio, l'immagine coincide con esso.

Le verifiche sperimentali di queste posizioni mutue del punto luminoso e della sua immagine, non possiamo farle ora, non potendo praticamente disporre di una sorgente luminosa puntiforme; le faremo allorchè avremo parlato dell'immagine di un oggetto (§ 25).

24. **Punto fuori dell'asse principale - Piano focale.** — Se il punto luminoso A è fuori dell'asse principale, si conduca l'asse secondario AC passante per esso (Fig. 40); tutto quanto si è detto per l'asse principale si può ripetere ora per un asse secondario. Esisterà su questo un *fuoco secondario* F_1, punto d'incontro di tutti i raggi riflessi dei raggi luminosi paralleli all'asse secondario AV_1. Di questi fuochi secondari ve n'è infiniti, uno per ogni asse. Il loro luogo (per uno specchio di piccola apertura) è sensibilmente un piano passante per il fuoco principale e perpendicolare all'asse principale; e si chiama il **piano focale.**

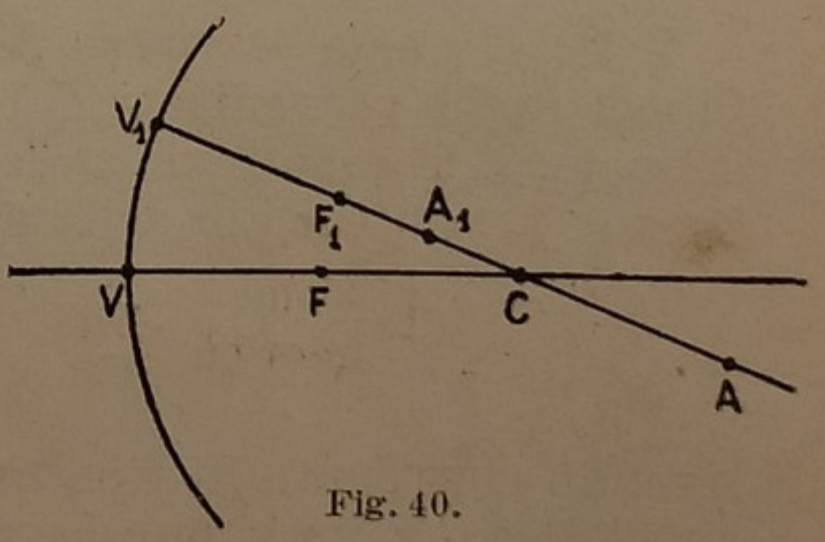


Fig. 40.

Applicando la formula 5), e contando le distanze p, q, f sull'asse secondario AV_1, si potrà trovare la posizione dell'immagine A_1 di A.

25. **Costruzione grafica dell'immagine.** — Ma se il punto luminoso è fuori dell'asse principale, se ne ottiene più facilmente l'immagine con una

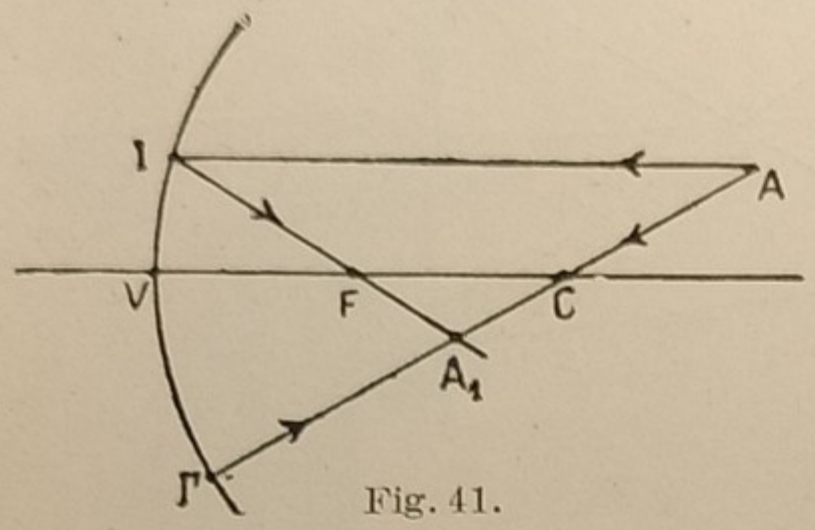


Fig. 41.

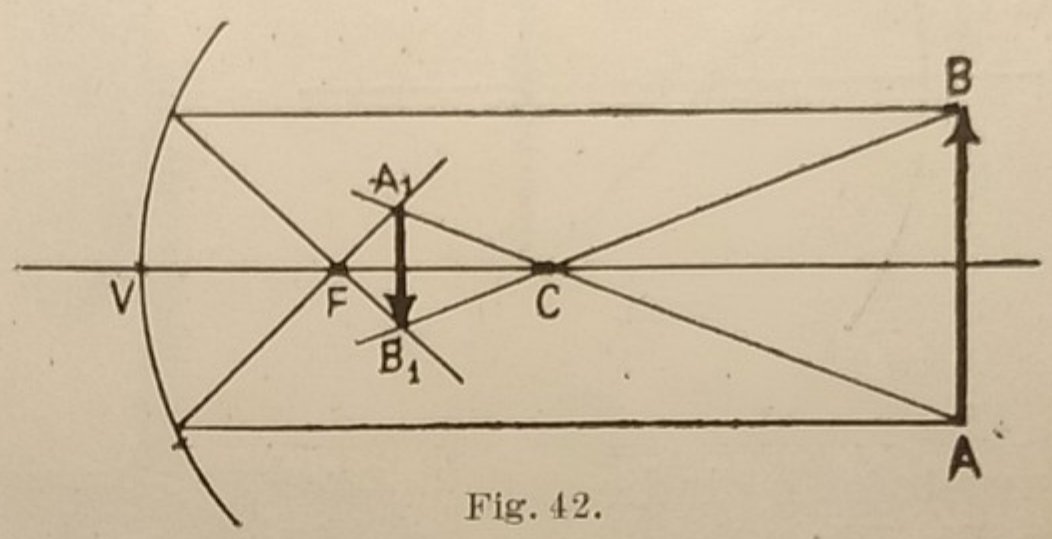


Fig. 42.

costruzione grafica. Questa è basata sul fatto che se, per definizione, l'immagine è il punto d'incontro di *tutti* i raggi riflessi, per determinarla basteranno *due soli* di tali raggi; e tra gli infiniti raggi partenti dal punto luminoso, ne sceglieremo *due particolari* di cui è nota la direzione in cui si riflettono.

Ecco la costruzione più comunemente adottata; dato uno specchio, il centro ed il fuoco sono da considerarsi come noti:

Sia A (Fig. 41) il punto luminoso: da esso conduciamo il raggio AI parallelo all'asse principale, che si riflette passando per il fuoco; si conduce poi il raggio ACI' passante per il centro di curvatura, che si riflette su sè stesso; i due raggi riflessi IF, $I'C$ s'incontrano in un punto A_1, che è l'immagine cercata.

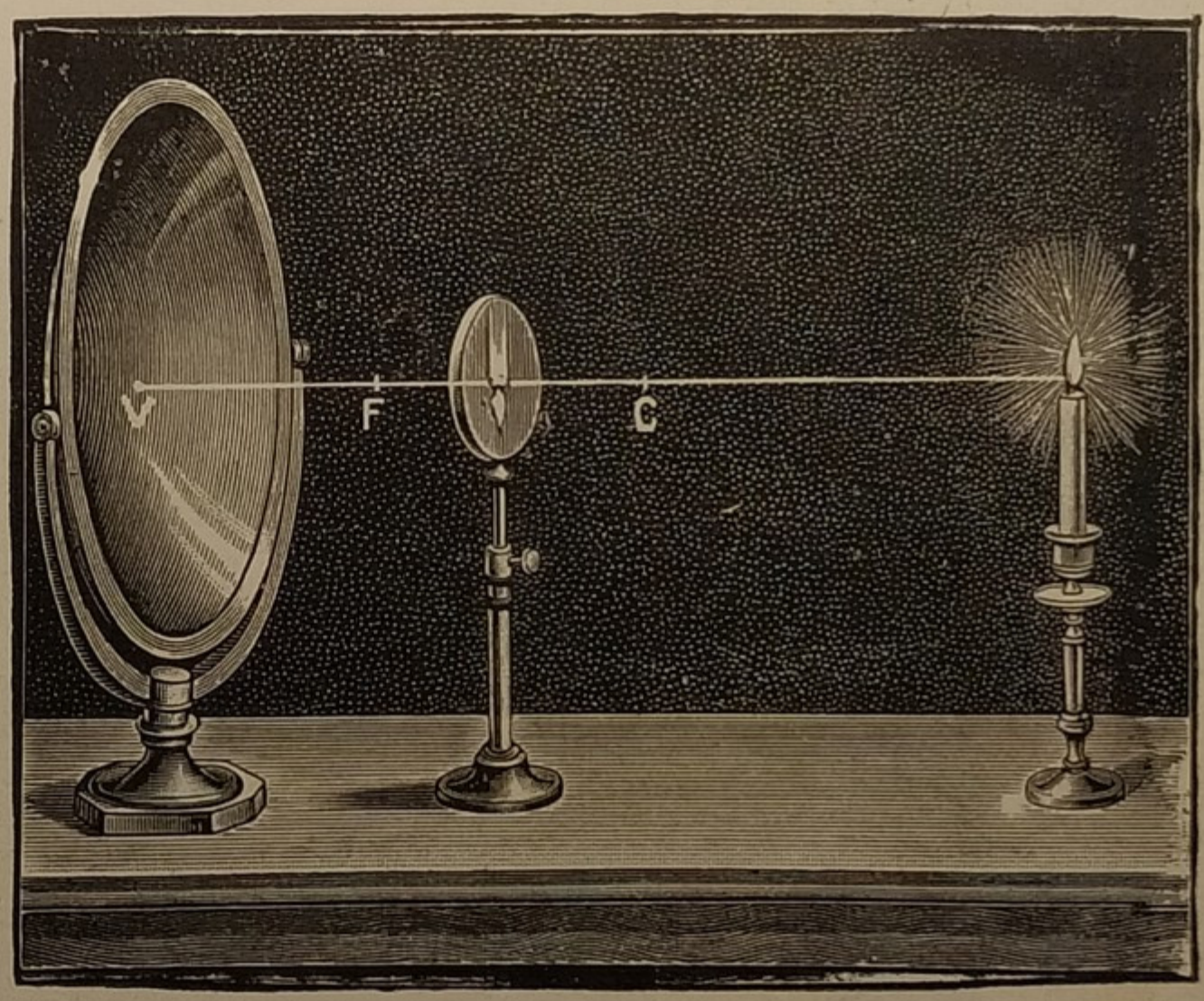


Fig. 43.

Applichiamo tale costruzione nei diversi casi, per trovare l'immagine di un oggetto. Questo sia rappresentato da una freccia, e ci limiteremo allora a trovare l'immagine degli estremi.

Riportiamo i casi principali, con le relative costruzioni grafiche; in esse AB rappresenta l'oggetto, ed A_1B_1 la sua immagine [1]:

1. Se l'oggetto è tra l'infinito ed il centro di curvatura, l'immagine è tra il fuoco ed il centro di curvatura; ed è reale, capovolta, impiccolita, (Fig. 42).

(1) Come regola mnemonica: l'immagine reale è capovolta e quella virtuale è diritta; tra l'oggetto e l'immagine è più grande chi è più distante dallo specchio (§ 26).

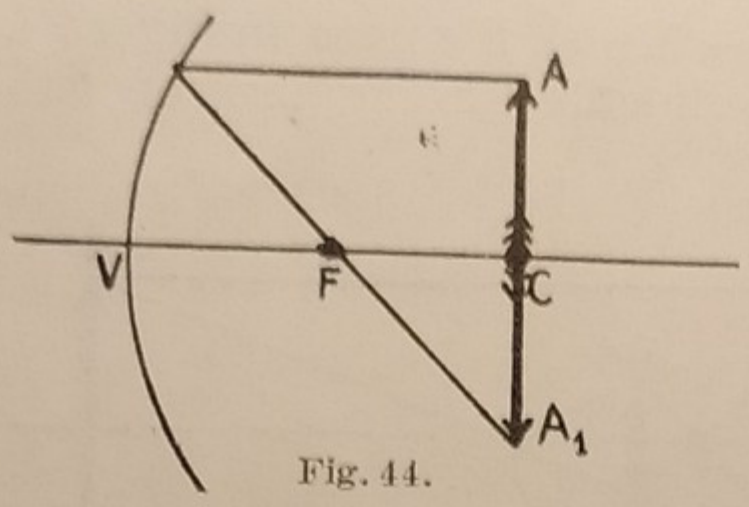


Fig. 44.

La verifica sperimentale è indicata nella Fig. 43.

2. Se l'oggetto è al centro di curvatura, anche l'immagine è al centro di curvatura; ed è reale, capovolta, della stessa grandezza, (Fig. 44).

Per la verifica si può collocare un vaso *V senza fiori*, su un sostegno al centro di curvatura *O* dello specchio, (Fig. 45). Sotto al sostegno è nascosto un mazzo di fiori *B*. Se ne ottiene un'immagine reale *B'* su *V*, che dà l'illusione

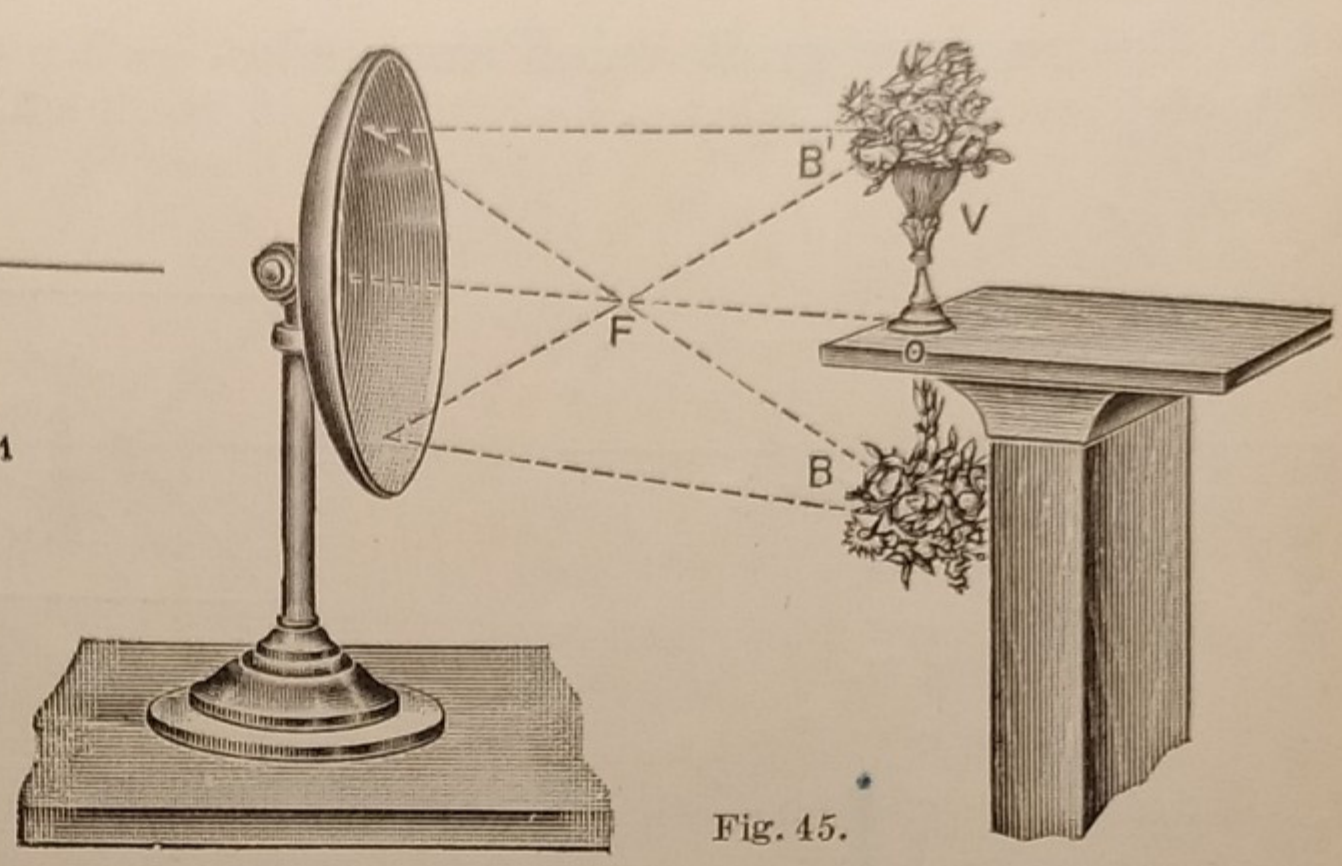


Fig. 45.

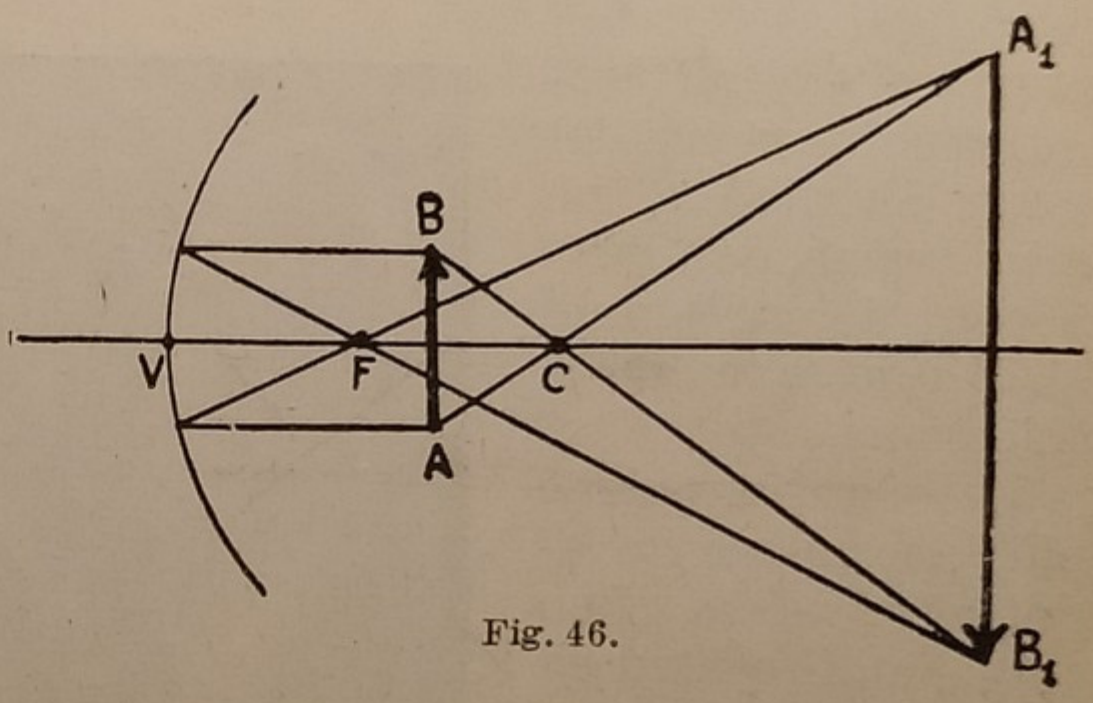


Fig. 46.

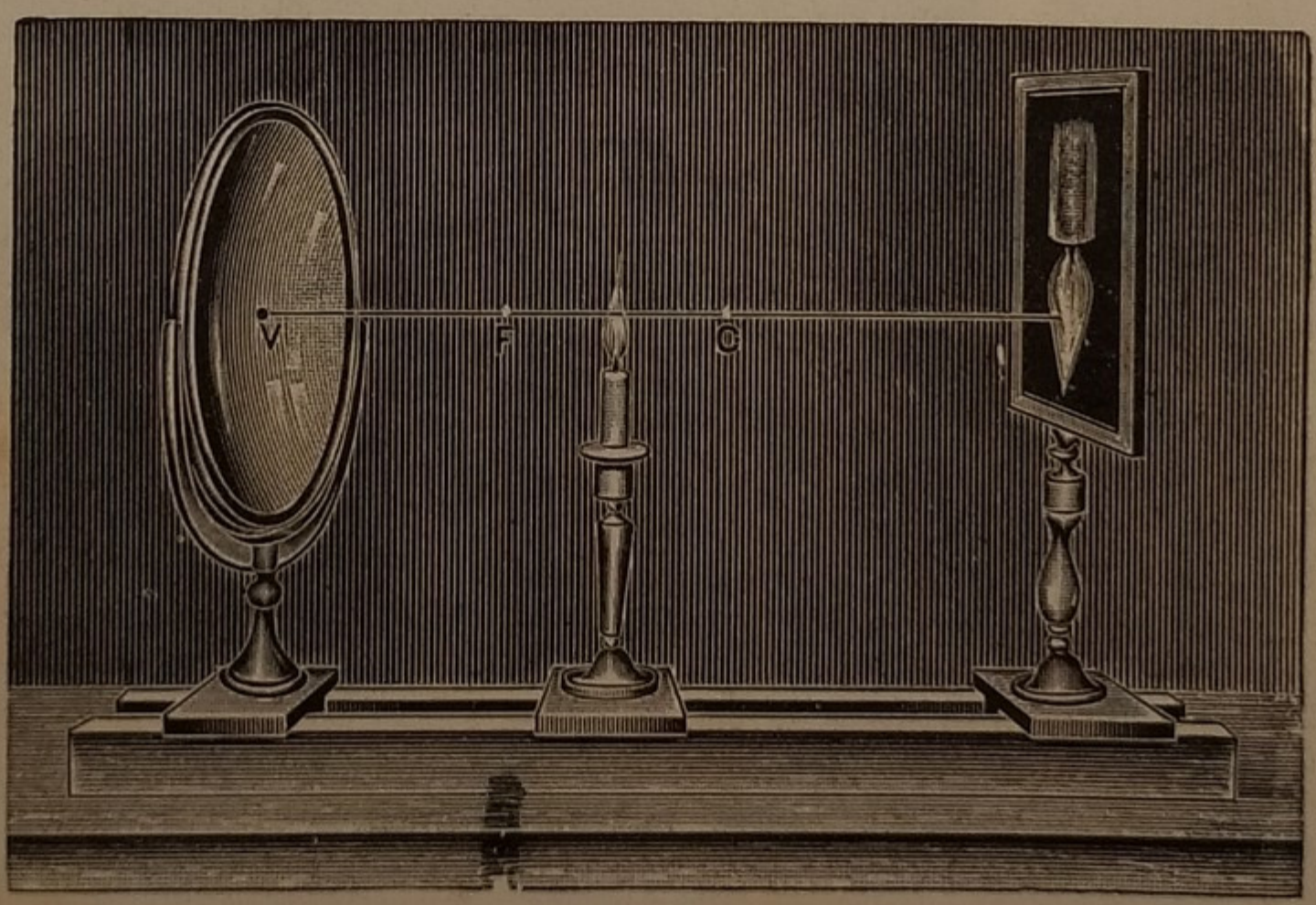


Fig. 47.

di un oggetto veramente esistente; tanto che sembra di vedere realmente un vaso col suo mazzo sopra.

3. Se l'oggetto è tra il centro di curvatura ed il fuoco, l'immagine è tra il centro di curvatura e l'infinito; ed è reale, capovolta, ingrandita, (Fig. 46). La verifica sperimentale, è rappresentata in Fig. 47.

4. Se l'oggetto è sul piano focale, l'immagine è all' infinito, infinitamente grande.

5. Se l'oggetto è tra il fuoco e lo specchio, l'immagine è dietro lo specchio, virtuale, diritta, ingrandita, (Fig. 48).

La verifica sperimentale è rappresentata nella Fig. 49.

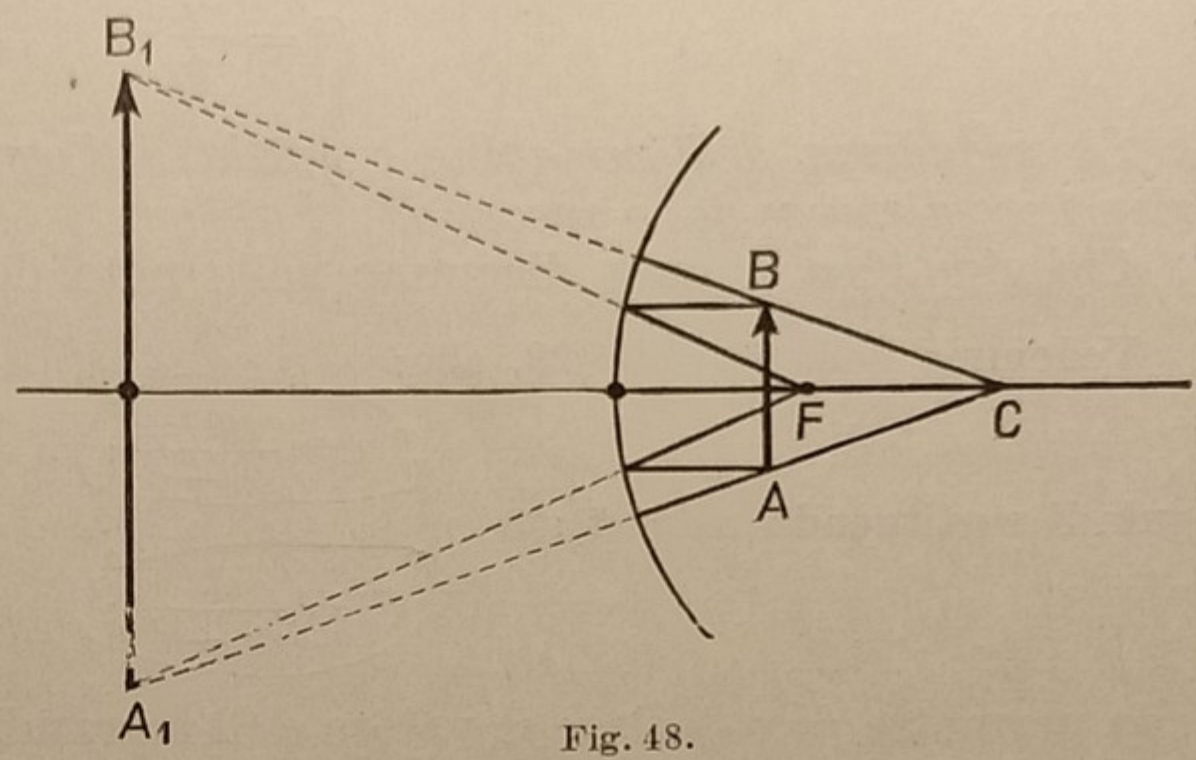


Fig. 48.

26. **Ingrandimento.** — Chiamasi *ingrandimento il rapporto fra la grandezza*[1] *dell'immagine e quella dell'oggetto.* Cioè, chiamando G l'ingrandimento è:

$$G = \frac{A_1 B_1}{A B}.$$

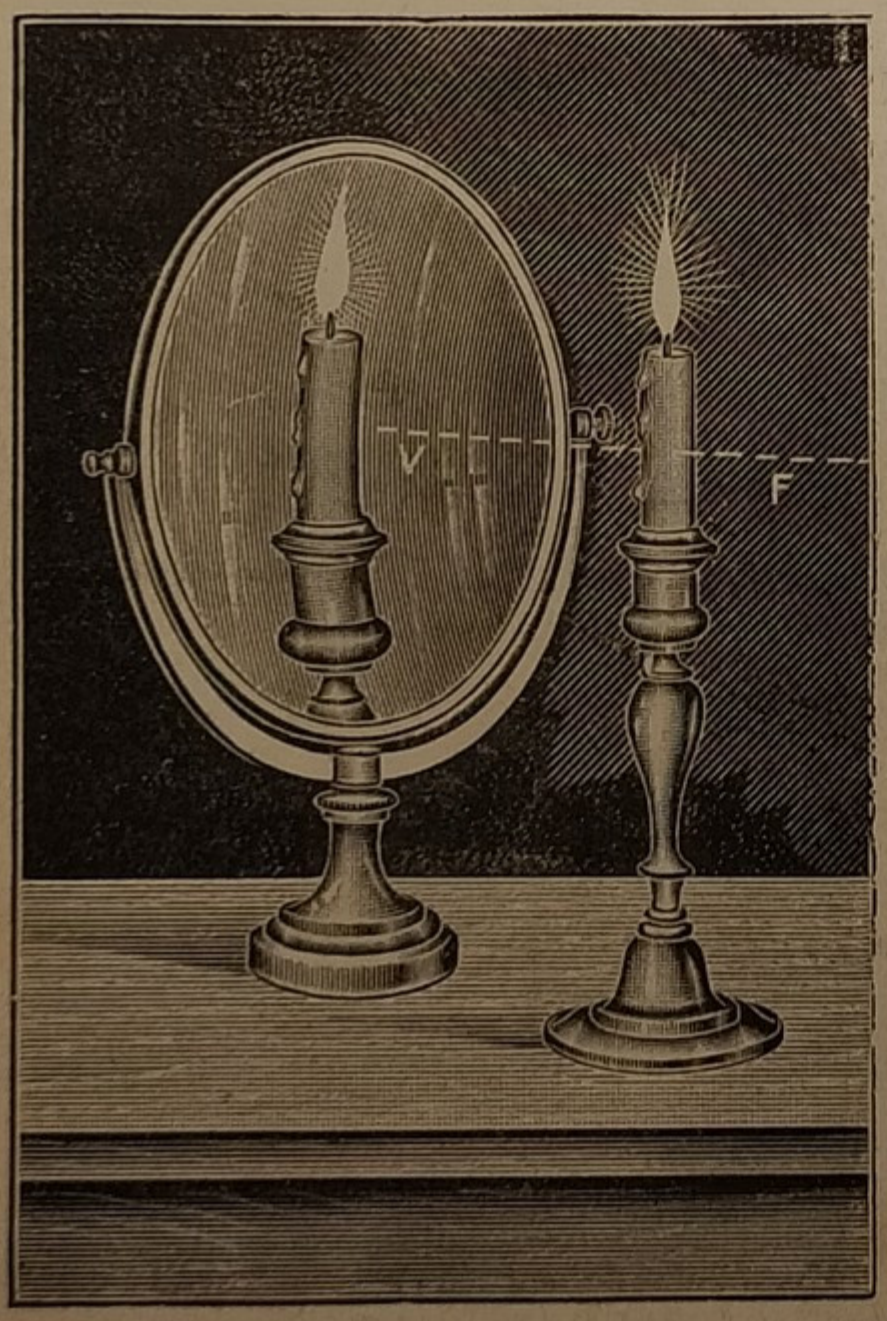


Fig. 49.

Ora, per la similitudine dei triangoli ABC, A_1B_1C (Fig. 50) è:

$$\frac{A_1 B_1}{A B} = \frac{C Q'}{C Q} = \frac{r - q}{p - r};$$

quindi:

$$G = \frac{r - q}{p - r}.$$

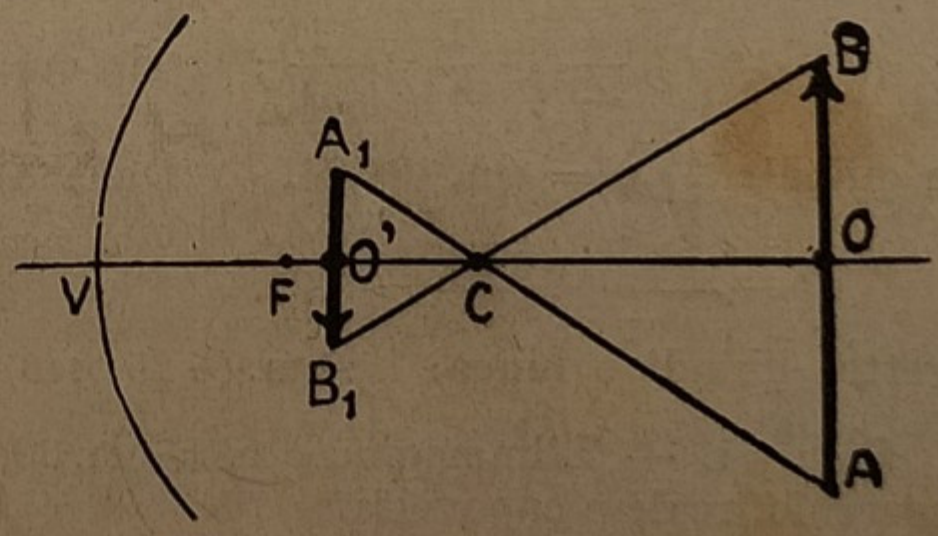


Fig. 50.

(1) Per grandezza dell'oggetto o dell'immagine in Ottica non s'intende la sua superficie (e tanto meno il volume), ma una dimensione lineare di questa. Così, se la figura è circolare, intenderemo il diametro; perciò si dice comunemente che (per un dato strumento d'ottica) *l'ingrandimento è*, ad es., *di 8 diametri*.

Dalla 3) del § 21 si ricava:

$$\frac{r-q}{p-r}=\frac{q}{p}\,;\quad \text{quindi sostituendo:}$$

7) $$G=\frac{q}{p}\,;\qquad \text{cioè:}$$

La grandezza dell'immagine e quella dell'oggetto, stanno tra loro come le rispettive distanze dallo specchio.

Ciò giustifica quanto dicemmo nella nota del § 25.

Vedemmo nella 6) del § 23, che:

$$q=\frac{pf}{p-f}\,;$$

quindi sostituendo nella 7):

8) $$G=\frac{f}{p-f}\,;$$

che permette di calcolare il valore dell'ingrandimento in funzione della distanza dell'oggetto dallo specchio.

Dalla 8) si ricava che per $p>2f$, è: $G<\frac{f}{2f-f}$, cioè: $G<1$; quindi l'immagine è minore dell'oggetto; ciò corrisponde al caso *1* del § 25. Per $p=2f$, è: $G=1$; cioè l'immagine è uguale all'oggetto; corrisponde al caso *2* del § 25. Se $p<2f$, è: $G>1$, e l'immagine è maggiore dell'oggetto; corrisponde ai casi *3* e *5* del § 29.

Esempio. — *Una persona alta m. 1,70 è posta a m. 1,50 da uno specchio concavo, la cui distanza focale è cm. 30; quant'è alta la sua immagine?*

Per la 8) sarà: $$G=\frac{30}{150-30}=\frac{1}{4}\,.$$

L'immagine è la quarta parte dell'oggetto, ossia: A_1B_1 = cm. (170 : 4) = **cm. 42,5.**

Problema. — *Uno specchio concavo di cm. 42 di raggio, è posto a cm. 25 da un oggetto lineare, lungo cm. 5. Trovare la posizione e la grandezza dell'immagine.*

Soluzione. — Dalla formula 5) dei punti coniugati, ponendo $f=21$, $p=25$, si ricava:

$$\frac{1}{25}+\frac{1}{q}=\frac{1}{21}\,;\qquad \text{da cui:}\qquad \frac{1}{q}=\frac{1}{21}-\frac{1}{25}=\frac{4}{525}\,;$$

e quindi: q = **cm. 131,25.** Dalla 8) si ricava poi:

$G=\frac{f}{p-f}=\frac{21}{4}=5{,}25$. Cioè l'immagine è 5,25 volte più grande dell'oggetto; quindi è lunga: cm. (5,25 × 5) = **cm. 26,25.**

Risposta. — L'immagine è alta cm. 26,25 ed è alla distanza di cm. 131,25 dallo specchio, reale e capovolta.

27. **Specchi convessi.** — Lo studio di questi specchi procede in modo analogo che per i concavi. Le definizioni di vertice V, centro di curvatura C, ed asse principale CV (Fig. 51), sono come per gli specchi concavi (§ 20). Sia A un punto dell'asse principale ed AI un raggio incidente, CIN la normale nel punto d'incidenza, IR il raggio riflesso. Come si vede, questo è

divergente con l'asse principale, e non l'incontra. Così avviene per tutti i raggi provenienti da A, *dovunque questo punto sia posto.*

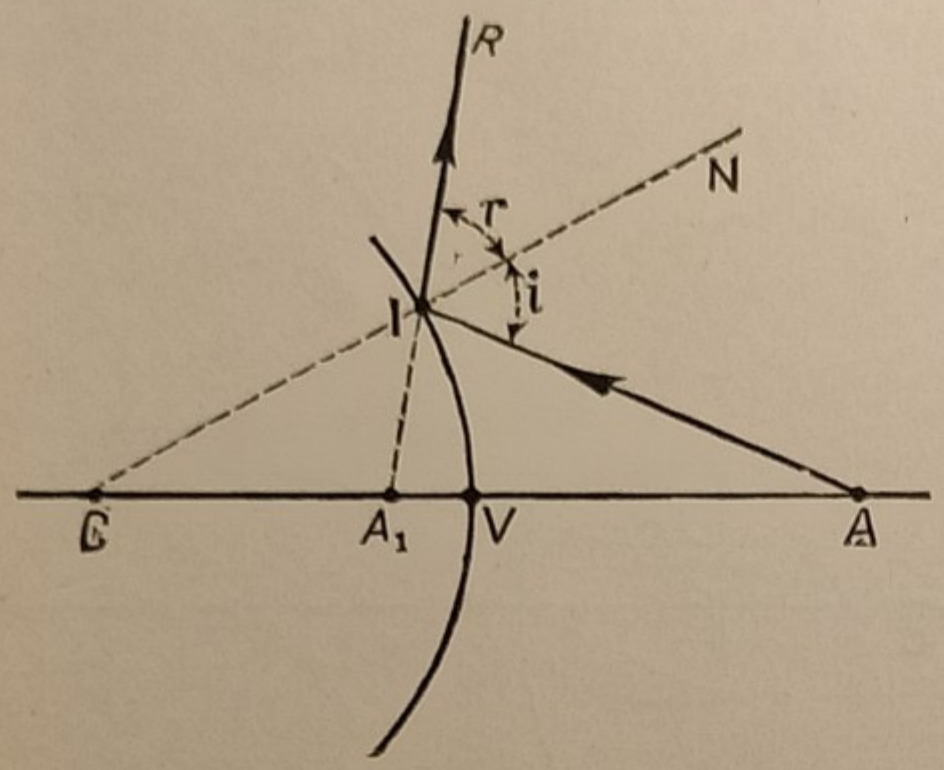


Fig. 51.

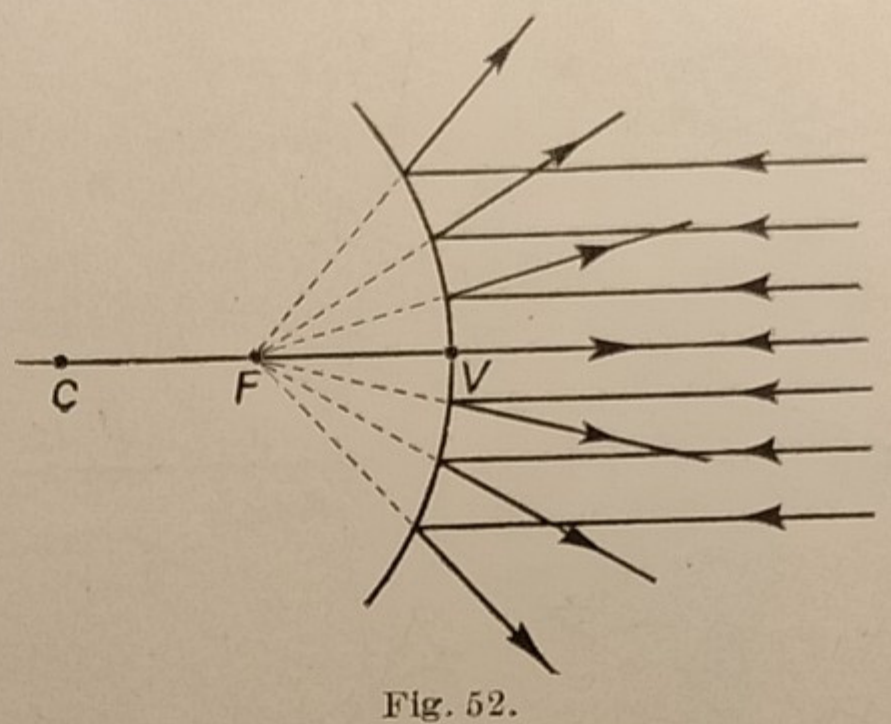


Fig. 52.

Se A è all'infinito, cioè i raggi pervengono allo specchio parallelamente all'asse principale, i prolungamenti dei raggi riflessi (se lo specchio è di piccola apertura), s'incontrano in un punto F a metà tra C e V (Fig. 52), che si chiama il **fuoco principale**; esso potrà vedersi con l'occhio, ma realmente non esiste; è cioè un *fuoco virtuale.*

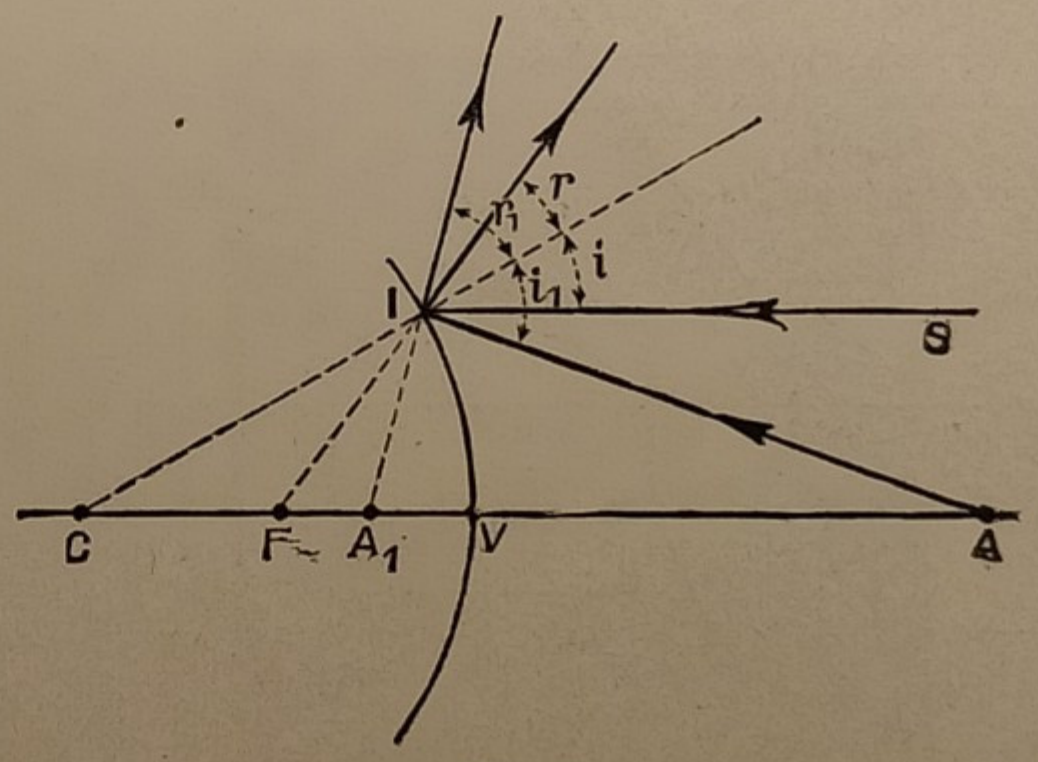


Fig. 53.

Confrontando il raggio parallelo SI, con un altro raggio AI proveniente da un punto qualunque A (Fig. 53), incidenti entrambi nello stesso punto I, si ha che l'angolo $i_1 > i$; quindi anche $r_1 > r$. Cioè il raggio riflesso di AI diverge più che quello riflesso di SI, ed incontrerà l'asse in A_1 tra F e V. Quindi, per ogni altro punto A ovunque posto sull'asse principale, i raggi riflessi, prolungati, s'incontrano in un punto A_1, anch'esso sull'asse principale, posto tra il fuoco e lo specchio, (Fig. 54).

Concludendo: *l'immagine di un punto, ovunque posto, è sempre virtuale, tra il fuoco e lo specchio.*

Per determinare la posizione dell'immagine nello specchio convesso, vale ancora una *formula dei punti coniugati*; che è la 5) del § 22, allorchè q ed f si considerino negativi, (§ 21). Cioè:

$$9) \qquad \frac{1}{p} - \frac{1}{q} = -\frac{1}{f}\,.$$

Se il punto è fuori dell'asse principale, ne troviamo senz'altro l'immagine applicando la seguente costruzione grafica: Sia A il punto luminoso,

(Fig. 55). Si traccia da A il raggio AI parallelo all'asse principale, che si riflette in modo che *il suo prolungamento* passi per il fuoco; si considera poi il raggio AC, che si riflette su sè stesso; i prolungamenti dei due raggi riflessi s'incontrano nel punto A_1, che è l'immagine cercata.

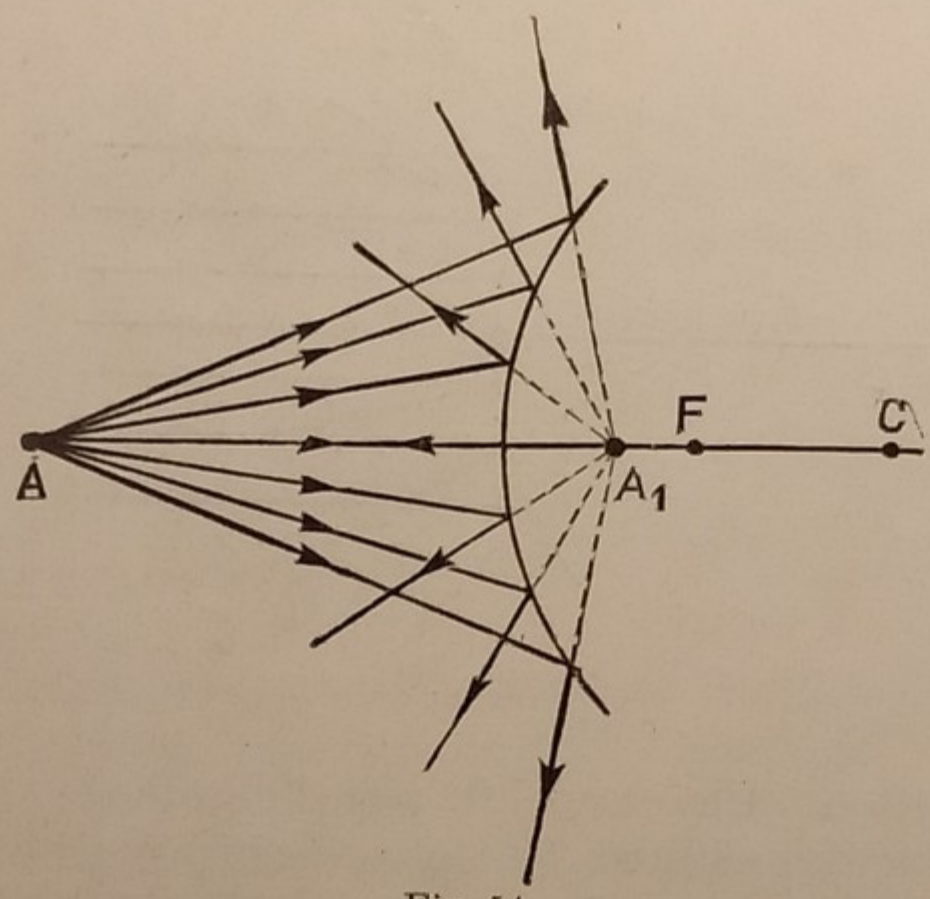


Fig. 54.

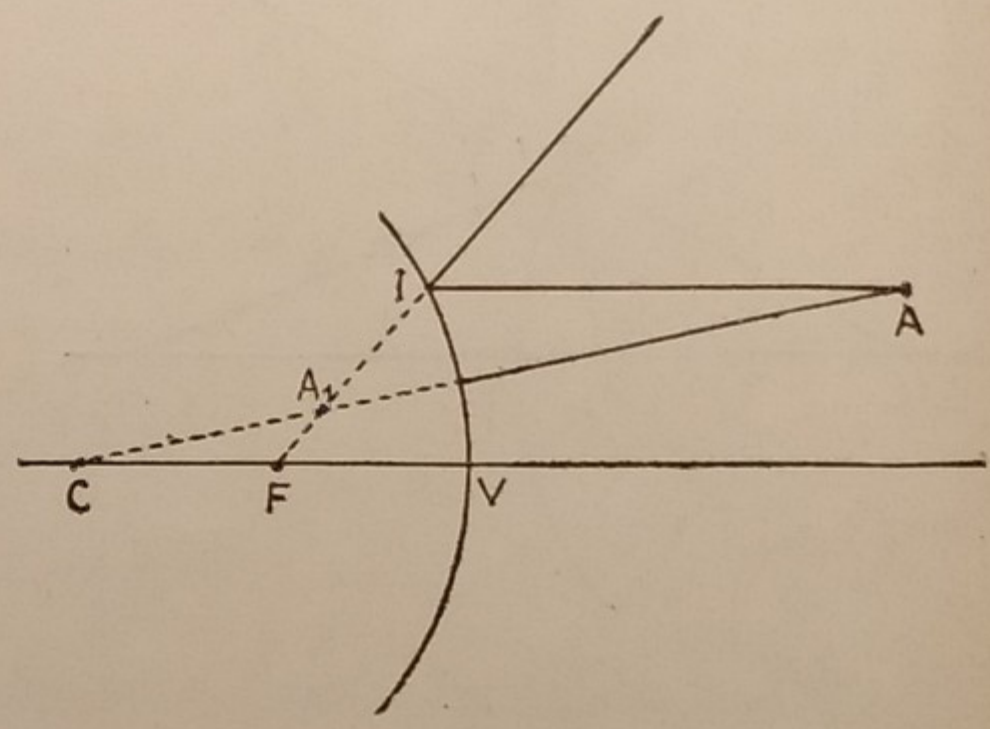


Fig. 55.

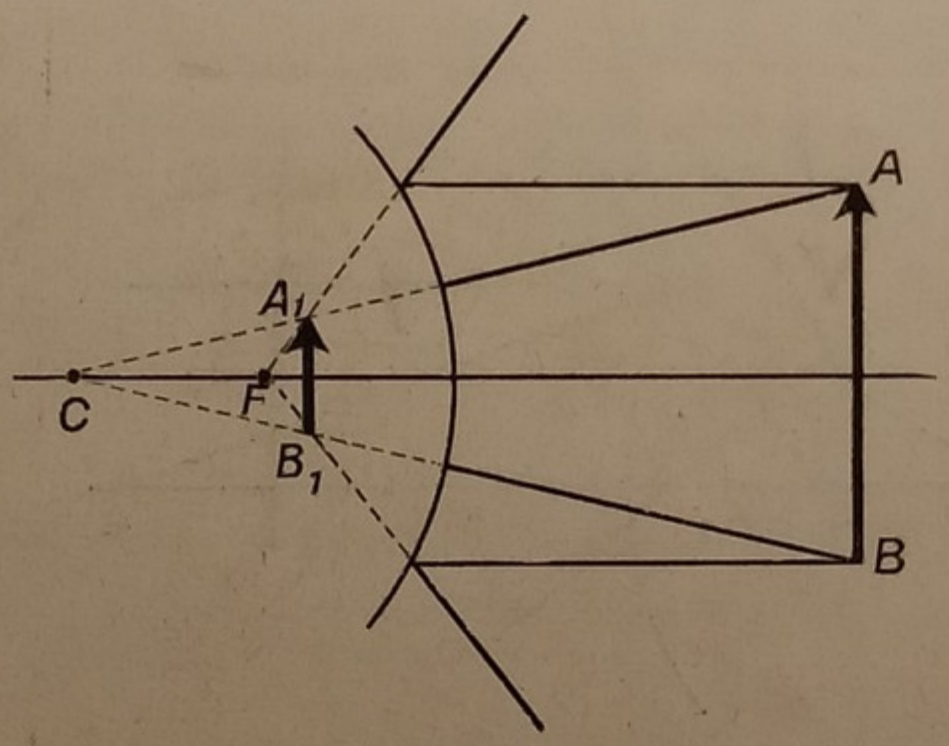


Fig. 56.

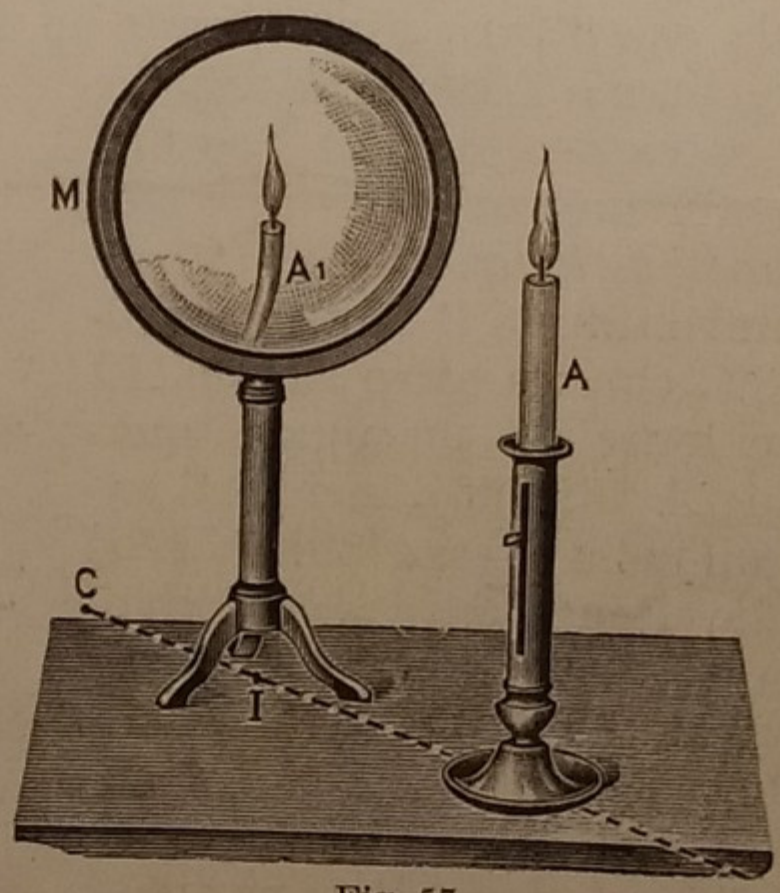


Fig. 57.

Se è dato un oggetto AB (Fig. 56), se ne trova allo stesso modo l'immagine A_1B_1; si ha che:

Ovunque sia l'oggetto, la sua immagine è sempre virtuale, diritta, impiccolita, tra il fuoco e lo specchio.

La Fig. 57 ne indica la verifica sperimentale.

28. **Applicazione degli specchi curvi - Proiettori.** — Si impiegano usualmente gli specchi sferici concavi per osservare l'immagine della nostra faccia ingrandita; come vediamo comunemente dal parrucchiere. Oppure, negli apparecchi da illuminazione, per proiettare un fascio di luce in direzione determinata. Per ciò si adopera uno specchio concavo, nel cui fuoco si pone la sorgente luminosa.

Ma ricordiamo che la proprietà di riflettere in un fascio parallelo i raggi luminosi provenienti dal fuoco, vale in via di approssimazione, *per specchi di piccola apertura*. Ciò limita assai l'intensità del fascio riflesso, per formare il quale viene utilizzata solo una frazione piccola della luce emanata dalla sorgente impiegata.

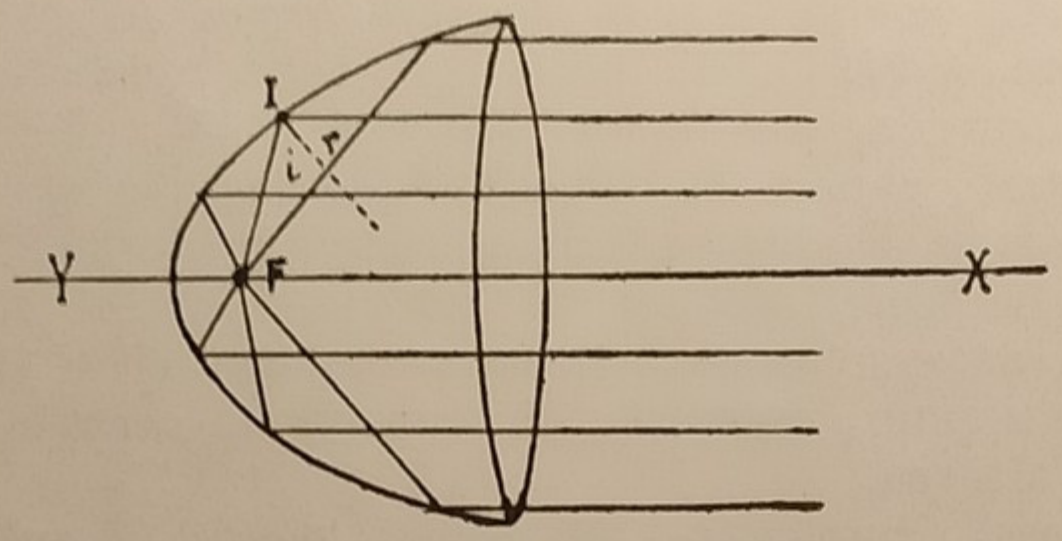


Fig. 58.

Fig. 59.

Si può evitare questo inconveniente adoperando uno **specchio parabolico**; cioè uno specchio la cui superficie è un *paraboloide*, quale si ottiene facendo ruotare un arco di *parabola* attorno al suo asse, (Fig. 58). Anche questo specchio ha un fuoco; cioè un punto F tale che tutti i raggi partenti da esso si riflettono in

Fig. 60.

Fig. 61.

un fascio di raggi paralleli all'asse YX; ma questa proprietà vale per tutti i raggi partenti da F, *qualunque sia l'apertura dello specchio*. Onde il fascio

riflesso è formato dalla quasi totalità dei raggi della sorgente posta in F, ed è perciò molto intenso.

In tal guisa son fatti i **fari degli automobili** (Fig. 59) ed i **proiettori** dell'esercito, impiegati ad illuminare di notte da lontano una zona del terreno o del cielo. In questi ultimi lo specchio raggiunge dimensioni notevoli (perfino 2 m. di diametro alla base) e vi si impiegano *lampade ad arco* elettrico di intensità fortissima, (§ 286). Tali proiettori, sono montati su un carro automobile; questo contiene anche una *dinamo* (§ 335) che mossa dallo stesso motore del carro, genera la corrente elettrica necessaria per il funzionamento della lampada. È stato ultimamente costruito per l'Esercito americano un gigantesco proiettore, con una sorgente luminosa di 800 milioni di *candele*; i raggi da esso proiettati sono visibili a oltre 150 km. di distanza; e, con tempo sereno, permette di scoprire un aeroplano che voli a più di 5000 m. di altezza.

Gli specchi sferici convessi s'impiegano nei veicoli perchè il guidatore veda dietro le sue spalle; hanno il vantaggio di permettere la visione dentro un angolo assai più vasto che non con uno specchio ordinario.

Altri specchi diversamente curvi, deformano in generale l'immagine; così fanno alcuni *specchi cilindrici* che si vedono nelle fiere a scopo di divertimento, (Figg. 60-61).

Problemi da risolvere.

1. Un segmento luminoso di 1 cm. è posto perpendicolarmente all'asse principale d'uno specchio concavo di 40 cm. di raggio ed a 25 cm. dallo specchio. A quale distanza dallo specchio occorre collocare uno schermo, perchè l'immagine dell'oggetto vi si proietti nettamente? quale sarà la grandezza di questa?

2. Uno specchio concavo ha la distanza focale di 50 cm. Un oggetto di 3 cm. di altezza forma un'immagine reale alta 6 cm. Dov'è posto l'oggetto?

3. Lo specchio precedente è a 5 m. da una parete, su cui si vuole proiettare la fiamma di una candela. In qual punto deve essere collocata la candela? Se la fiamma è alta 3 cm, qual'è la grandezza dell'immagine?

4. Quale dev'essere la distanza focale di uno specchio concavo, perchè l'immagine di un oggetto alto 75 cm. (in un piano perpendicolare all'asse principale), posto a m. 2,50 dallo specchio, sia di cm. 15?

5. Una palla speculare di 10 cm. di raggio, è illuminata da una finestra di m. 1,50 di altezza e m. 1,00 di larghezza, posta alla distanza di 5 m. Determinare posizione e grandezza dell'immagine.

Rifrazione.

29. **La rifrazione della luce.** — Dobbiamo ora studiare il passaggio della luce attraverso mezzi trasparenti diversi.

Si abbiano due mezzi trasparenti illimitati, di diversa densità, separati da una superficie piana: ad es., aria ed acqua. Sia MM' (Fig. 62) la sezione del piano di separazione. Sia SI un raggio luminoso proveniente dal primo mezzo; si chiama il *raggio incidente*, ed I il *punto d'incidenza*.

Sia NN' la perpendicolare ad MM' nel punto I: si chiama la *normale nel punto d'incidenza*. Il raggio SI penetrando nel secondo mezzo, non prosegue in generale nella stessa direzione; ma l'esperienza mostra che esso devia, avvicinandosi o allontanandosi rispetto alla normale.

Se il raggio, come nella Fig. 62, si avvicina alla normale, chiameremo i 2° mezzo *più rifrangente* [1] del 1°; se si allontana dalla normale, chiameremo il 2° mezzo *meno rifrangente* del 1°. Quindi, parafrasando diremo:

Se un raggio luminoso passa da un mezzo meno rifrangente ad uno più rifrangente si avvicina alla normale; se invece passa da un mezzo più rifrangente ad uno meno rifrangente si allontana dalla normale.

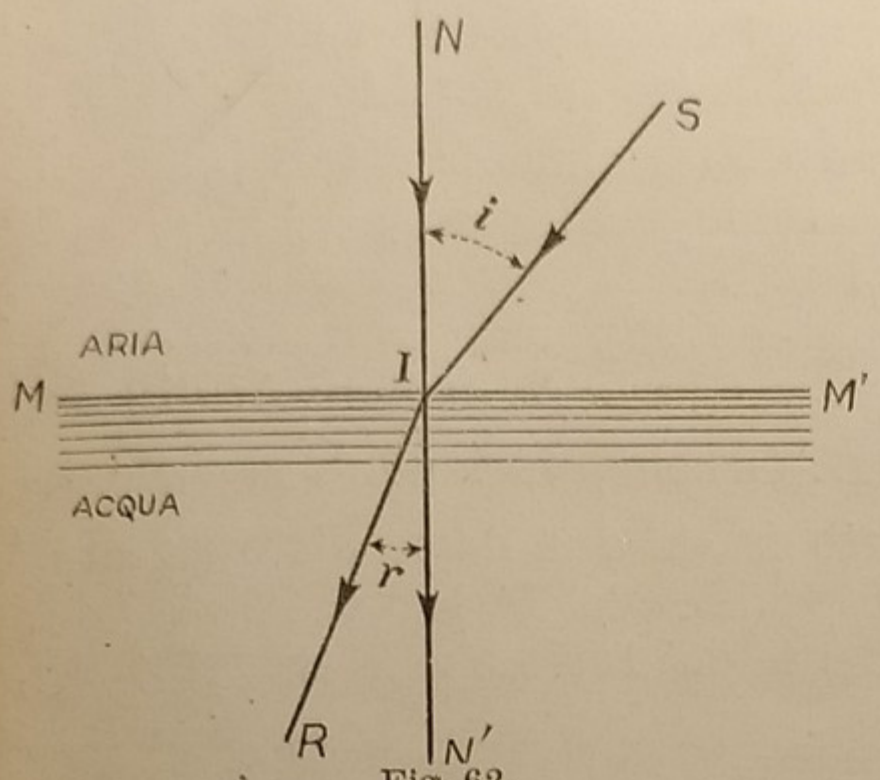


Fig. 62.

Il raggio IR che prosegue nel 2° mezzo, si chiama il *raggio rifratto*; l'angolo $i = \widehat{SIN}$ che il raggio incidente forma con la normale nel punto d'incidenza, si chiama *angolo d'incidenza*; l'angolo $r = \widehat{RIN'}$ che il raggio rifratto forma con la medesima normale, dicesi *angolo di rifrazione.*

30. **Leggi della rifrazione.** — Il fenomeno della rifrazione è governato dalle due leggi seguenti, dovute a Descartes [2], (1637):

1. Il seno dell'angolo d'incidenza sta al seno dell'angolo di rifrazione in un rapporto costante, che si chiama indice di rifrazione relativo ai due mezzi considerati [3].

Cioè:

$$1) \qquad \frac{\operatorname{sen} i}{\operatorname{sen} r} = n$$

dove n è l'indice di rifrazione; esso è costante per due dati mezzi, ma varia naturalmente col variare di questi.

2. Il raggio incidente, il raggio rifratto e la normale nel punto d'incidenza, giacciono nel medesimo piano, che si chiama *il piano d'incidenza.*

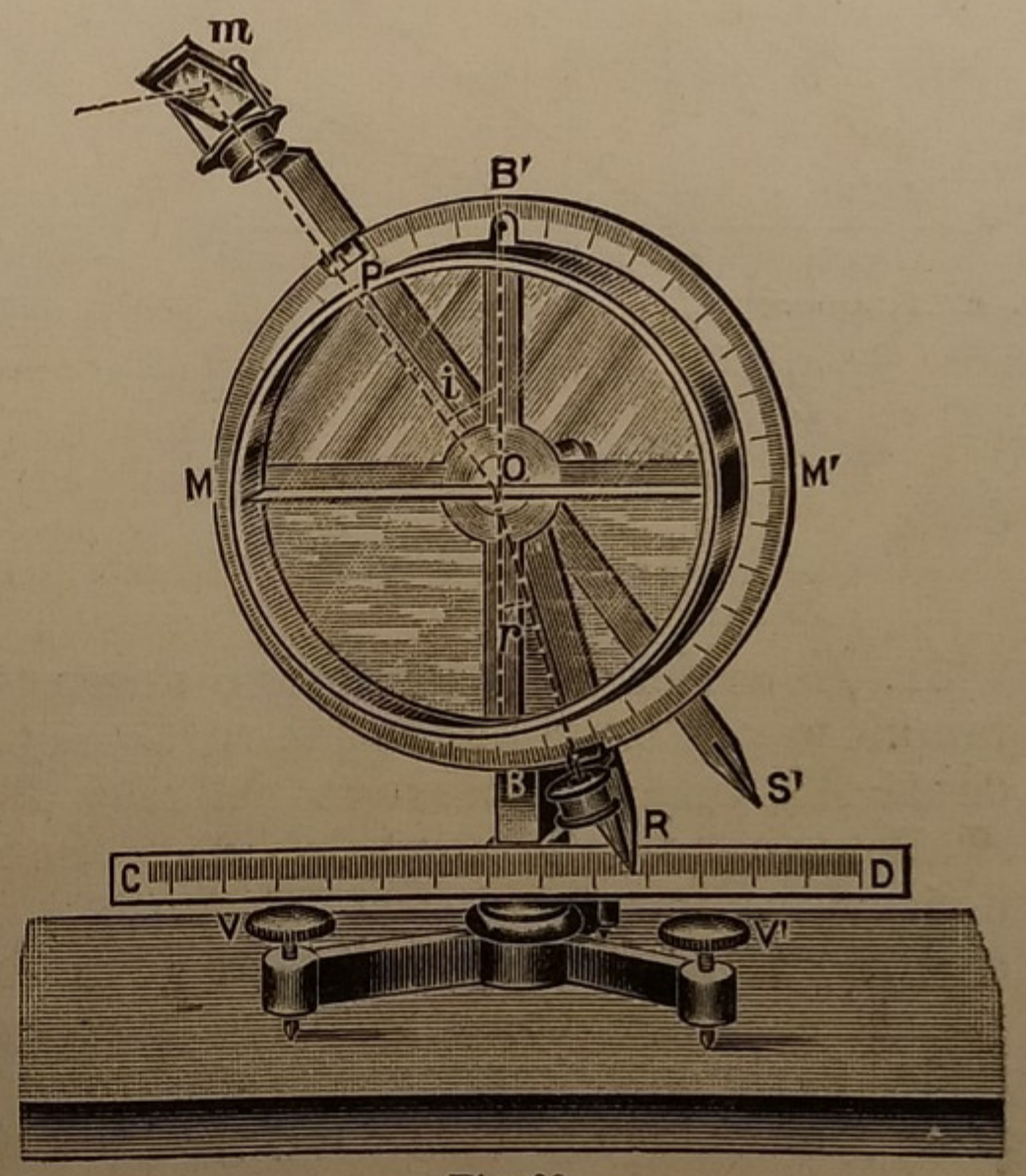


Fig. 63.

La verifica sperimentale di queste leggi si fa con l'apparecchio rappresentato nella Fig. 63. Esso è ancora quello che adoperammo per la riflessione (§ 12); ma lo specchio è sostituito da una vaschetta cilindrica di vetro, che si riempie d'acqua a metà, in modo che il piano di livello MM' di essa passi per il centro O del cerchio graduato.

---

(1) Non si confonda la rifrangenza con la densità; un mezzo più denso può essere meno rifrangente e viceversa. Così, ad es., l'alcool, l'olio di oliva, l'essenza di trementina, il petrolio, sono più rifrangenti dell'acqua, sebbene meno densi.

(2) Descartes (Cartesio) Réné du Perron; n. a La Haye (Touraine) nel 1596, m. a Stoccolma nel 1650.

(3) Questa va anche sotto il nome di *legge dei seni* o *di Snell.*

Si dirige anche ora nella direzione di un raggio del cerchio, un raggio incidente PO di luce solare o artificiale, servendosi di uno specchietto m; l'angolo POB' è l'angolo d'incidenza i, e si legge sul cerchio graduato. Il raggio rifratto è raccolto sul centro di un diaframma R; $\widehat{ROB}$ è l'angolo di rifrazione r, e si legge anch'esso sul cerchio graduato.

Determinati questi angoli, se ne calcolano i seni con le tavole: oppure, si può determinare il rapporto dei due seni, col rapporto equivalente delle distanze delle punte S' ed R dal diametro verticale BB'; le quali distanze si possono leggere sul regolo graduato CD. Orbene, variando $\widehat{i}$ si vede variare anche $\widehat{r}$; ma in modo che il rapporto fra le due dette distanze di S' ed R da BB' si mantiene costante. Ciò verifica la 1ª legge.

La 2ª è verificata anche ora implicitamente dal fatto che le tre rette PO, OR, BB', giacciono in uno stesso piano, parallelo a quello del cerchio graduato.

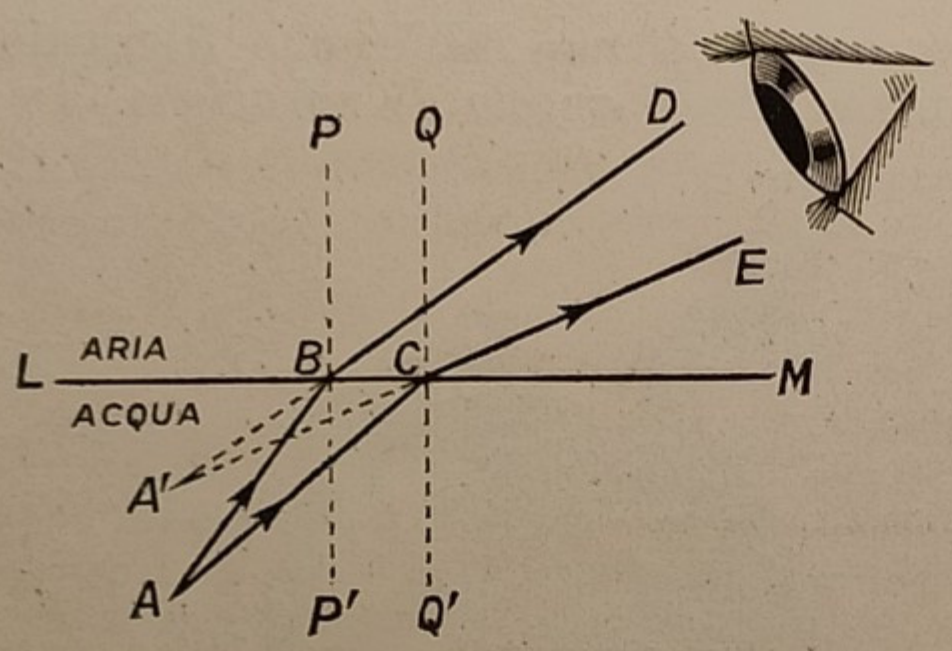


Fig. 64-*a*.

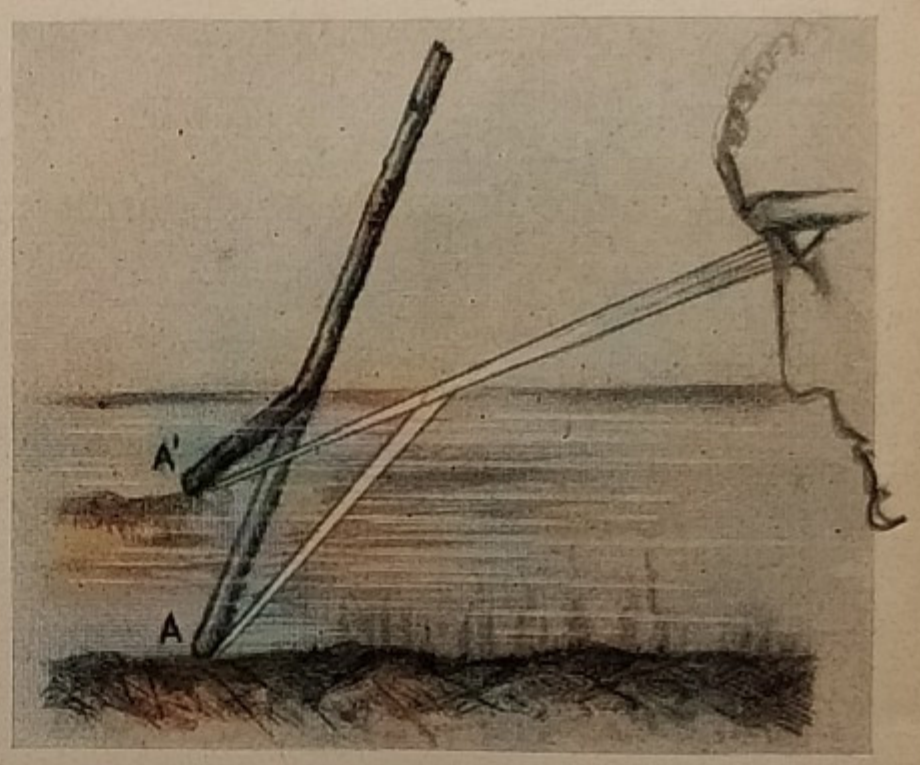


Fig. 64-*b*.

31. **Esperienza del bastone spezzato.** — Sia A (Fig. 64-*a*) un punto luminoso posto nel mezzo più rifrangente, ad es., nell'acqua; dei raggi incidenti AB ed AC passando nel mezzo superiore meno rifrangente (aria), si allontanano dalla normale, ed escono nella direzione BD e CE. L'occhio li riceve come se venissero dal punto A' d'incontro dei loro prolungamenti; cioè scorge A in A', più in alto.

Così si spiega come una vasca piena d'acqua sembri meno fonda del reale. Parimenti, immergendo un bastone obliquamente nell'acqua, l'estremità A si vede in A' (Fig. 64-*b*); cioè il bastone appare spezzato e raccorciato.

32. **Indice assoluto di rifrazione** di un dato mezzo, è l'indice relativo al passaggio della luce dal vuoto a questo mezzo.

Dimostreremo in seguito (§ 39), che se n_1 è l'indice assoluto di un 1° mezzo, n_2 l'indice assoluto di un 2° mezzo, ed n l'indice relativo al passaggio dal 1° al 2° mezzo, è:

$$2) \qquad n = \frac{n_2}{n_1}.$$

Ne consegue che se n è l'indice relativo al passaggio dal 1° al 2° mezzo, sarà $\frac{n_1}{n_2} = \frac{1}{n}$ l'indice relativo al passaggio inverso dal 2° mezzo al 1°.

Diamo il valore degli indici di rifrazione (per la luce gialla) di alcuni fra i mezzi trasparenti più noti:

SOSTANZA	DENSITÀ	n	SOSTANZA	DENSITÀ	n
Aria	—	1,0003	Essenza di trementina . . .	0,872	1,474
Acqua	1	1,334	Toluolo	0,865	1,495
Alcool	0,815	1,365	Vetro crown (variabile)	2,535	1,529
Etere	0,735	1,374	Vetro flint (variabile)	3,723	1,630
Glicerina	1,28	1,413	Solfuro di carbonio	1,293	1,631
Olio d'oliva . . .	0,915	1,470	Diamante	3,521	2,417

Come si vede il diamante è il corpo che ha il massimo indice di rifrazione, e notevolmente superiore agli altri corpi. Per tale ragione gli effetti di luce prodotti dai brillanti veri, non si potranno mai ottenere con altri corpi trasparenti diversi; cioè i brillanti non possono essere imitati da altre sostanze e si riconoscono facilmente da queste.

Problema. — *Un raggio luminoso incide con l'angolo di 50° 30′ sul centro della superficie dell'acqua, contenuta in un vaso della forma di un cilindro retto, sino all'altezza di cm. 25. Calcolare a che distanza dal centro il raggio rifratto incontra la base del recipiente.*

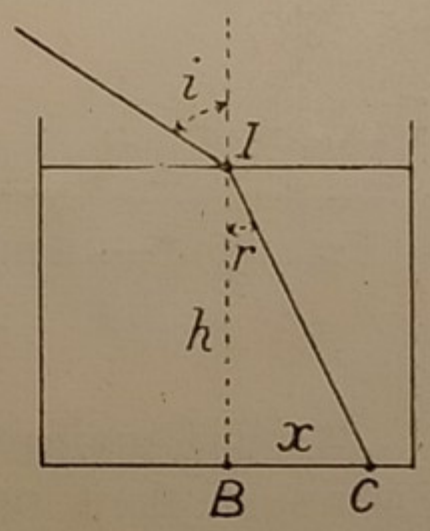


Fig. 65.

Soluzione. — Consideriamo la sezione del recipiente col piano d'incidenza (Fig. 65); sia h l'altezza dell'acqua, $x = BC$ la distanza richiesta. Si ha:

$$a) \qquad x = h \operatorname{tang} r.$$

Esprimendo tang r per sen r, si ha: $\operatorname{tang} r = \dfrac{\operatorname{sen} r}{\sqrt{1 - \operatorname{sen}^2 r}}$, (col radicale positivo perchè $r < 90°$).

Dalla legge della rifrazione (§ 30), si ricava: $\operatorname{sen} r = \dfrac{\operatorname{sen} i}{n}$, essendo n l'indice di rifrazione dell'aria relativo all'acqua; sostituendo nella a):

$$b) \qquad x = h \frac{\operatorname{sen} i}{n\sqrt{1 - \dfrac{\operatorname{sen}^2 i}{n^2}}} = h \frac{\operatorname{sen} i}{\sqrt{n^2 - \operatorname{sen}^2 i}} = \frac{h \operatorname{sen} i}{\sqrt{(n + \operatorname{sen} i)\ (n - \operatorname{sen} i)}}.$$

I dati del problema sono: $h =$ cm. 25; $i = 50° 30'$; $n = 1{,}334$; dalle tavole logaritmiche si ricava: $\operatorname{sen} 50° 30' = 0{,}77162$; quindi:

$$n + \operatorname{sen} i = 1{,}334 + \operatorname{sen}\ 50° 30' = 2{,}10562$$
$$n - \operatorname{sen} i = 1{,}334 - \operatorname{sen}\ 50° 30' = 0{,}56238\ .$$

Sostituendo nella b):

$$\mathrm{x} = \mathrm{cm} \frac{25 \times 0{,}77162}{\sqrt{2{,}10562 \times 0{,}56238}} = \textbf{cm. 17,73 circa.}$$

33. **Angolo limite.** — Consideriamo il passaggio della luce da un mezzo meno rifrangente ad un altro più rifrangente, e facciamo variare l'angolo d'incidenza fra i valori estremi di 0° e 90°. Se l'angolo d'incidenza è zero, cioè il raggio luminoso viene in direzione della normale, anche l'angolo di rifrazione è zero.

Difatti la 1) del § 30, ridotta a forma intera, si scrive: $\text{sen}\, i = n\, \text{sen}\, r$.

Per $\widehat{i} = 0$, è: $\text{sen}\, i = 0$; quindi nella precedente: $0 = n\, \text{sen}\, r$; essendo $n \gtrless 0$, dev'essere: $\text{sen}\, r = 0$, cioè: $\widehat{r} = 0$ (essendo $\widehat{r} < 90°$).

Dunque il raggio rifratto in questo caso prosegue anch'esso nella direzione della normale. È questo l'unico caso in cui il raggio rifratto non subisce deviazione.

Aumentando l'angolo d'incidenza da 0° a 90°, cresce anche l'angolo di rifrazione da 0° ad un valore massimo, minore di 90°. Questo massimo angolo di rifrazione l, corrispondente all'angolo d'incidenza di 90° (cioè quando il raggio incidente giace sul piano di separazione dei due mezzi), si chiama *angolo limite*, (Fig. 66).

Per $i = 90°$, è: $\text{sen}\, i = 1$, e la 1) diventa: $1 = n\, \text{sen}\, l$; da cui:

$$3) \qquad \text{sen}\, l = \frac{1}{n}\,; \qquad \text{cioè:}$$

l'angolo limite è quello il cui seno è l'inversa dell'indice di rifrazione.

Esempio. — Angolo limite fra aria e acqua = 48° 35′
» » » » » vetro = 42° circa.

34. **Riflessione totale.** — Consideriamo ora il passaggio inverso della luce, dal mezzo più rifrangente al meno rifrangente. Il raggio normale $N'I$ (Fig. 66), per il principio della reciprocità del cammino dei raggi luminosi (§ 23), uscirà nella direzione IN; i raggi incidenti R_1I, R_2I, R_3I,... usciranno rispettivamente nelle direzioni IS_1, IS_2, IS_3..., allontanandosi dalla normale; l'ultimo raggio uscente è R_4I con un angolo d'incidenza l eguale all'angolo limite, ed uscirà nella direzione IS_4, cioè lambendo il piano di separazione dei due mezzi.

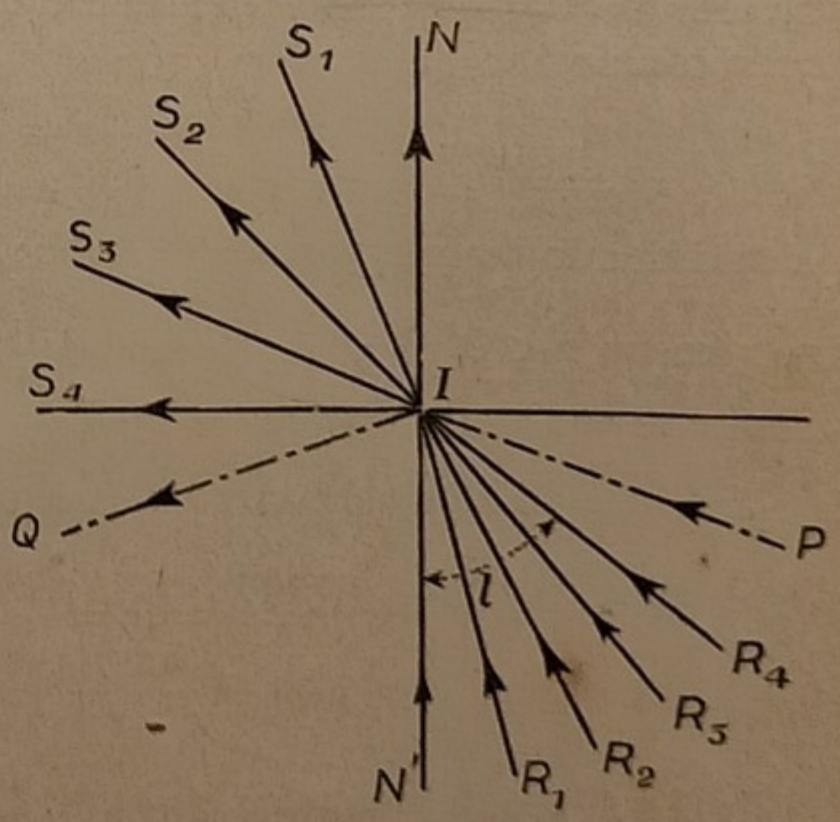


Fig. 66.

Ma un raggio PI, che formi un angolo d'incidenza PIN' maggiore dell'angolo limite, non può uscire; esso torna indietro nello stesso mezzo, nella direzione IQ, come se la superficie di separazione dei due mezzi fosse uno specchio. Questo fenomeno si chiama *la riflessione totale.*

La riflessione totale dunque avviene quando un raggio proviene da un mezzo più rifrangente, con un angolo d'incidenza maggiore dell'angolo limite.

Si noti che per i raggi incidenti con angolo minore di l, vi è anche riflessione. Si pensi infatti che la luce si riflette sulla prima superficie che limita un corpo trasparente, come vediamo guardando su una lastra di vetro comune. Ma se l'angolo d'incidenza è minore dell'angolo limite, la riflessione è solo parziale, cioè per piccolo numero dei raggi incidenti; mentre tutti gli altri raggi incidenti proseguono uscendo nell'altro mezzo. Crescendo l'angolo d'incidenza, aumenta la parte dei raggi che si riflettono; quando l'angolo d'incidenza supera l'angolo limite, i raggi si riflettono *tutti*; da ciò il nome di riflessione totale.

Fig. 67.

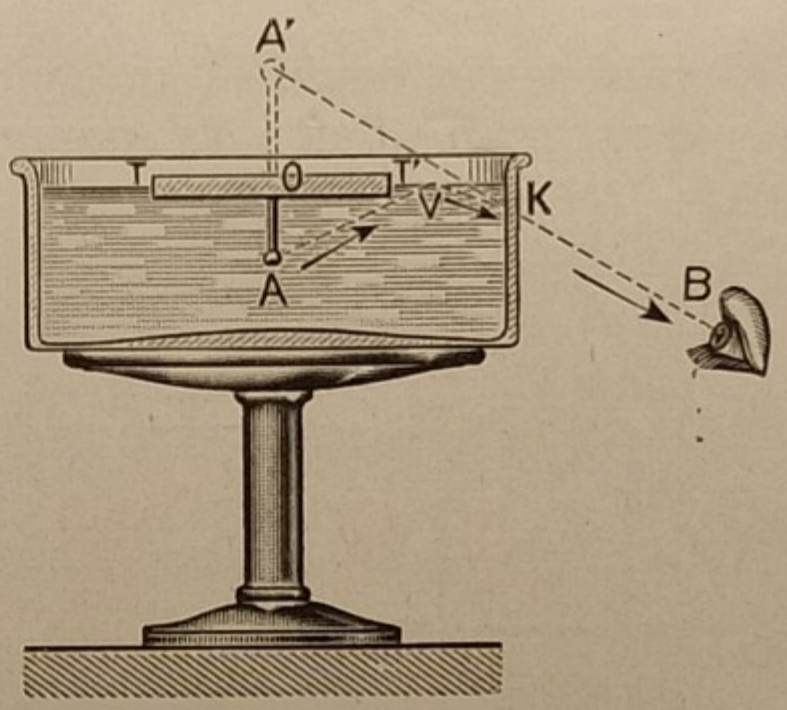


Fig. 68.

La verifica sperimentale di questo fenomeno può farsi con le seguenti esperienze:

1. Si riempie d'acqua un bicchiere e si solleva al di sopra dell'occhio; guardando obliquamente al di sotto della superficie dell'acqua, si vede brillare questa superficie come uno specchio; e un pezzo del manico di un cucchiaio immerso nell'acqua, vi si riflette come su uno specchio, (Fig. 67).

2. Si mette a galleggiare sull'acqua un disco di sughero TT', al centro del quale è infisso uno spillo A, (Fig. 68). Se questo non è troppo lungo, non vi è alcuna posizione da cui esso si possa scorgere, guardando *al di sopra* dell'acqua. Ciò perchè essendo il disco opaco, i raggi luminosi che potrebbero uscire sono quelli oltre AV; ma questi incidono con angolo maggiore dell'angolo limite, quindi si riflettono totalmente, e potranno essere visti solo *dal di sotto*; infatti ponendo l'occhio in B si vedrà l'immagine dello spillo, riflessa in A' come su uno specchio.

È anche facile calcolare l'altezza massima che può avere lo spillo. Essendo il triangolo $T'OA$ rettangolo in O, e l'angolo OAV = all'angolo limite = 48° 35′, sarà:

$$OA = OT' \cot g\, 48°\,35' = 0{,}88 \times OT' = 0{,}44 \times TT'.$$

Quindi lo spillo non deve superare i $^2/_5$ del diametro del disco di sughero.

35. **Prisma a riflessione totale.** — Un'applicazione del fenomeno precedente si ha nei *prismi a riflessione totale.*

Si abbia un prisma di vetro la cui sezione normale sia un triangolo rettangolo isoscele, (Fig. 69). Sia SI un raggio luminoso perpendicolare ad un cateto AC; esso prosegue nel vetro senza deviare (§ 33), e cade sulla ipotenusa con un angolo d'incidenza $\widehat{SI'N}$ eguale a 45° (poichè $\widehat{SI'N} = \widehat{BAC}$ avendo i lati perpendicolari ed essendo entrambi acuti). Ma l'angolo limite tra vetro e aria è circa 42° (§ 33), quindi $\widehat{SI'N}$ supera l'angolo limite ed SI' si riflette totalmente nella direzione $I'R$, perpendicolare all'altro cateto BC, da cui esce senza deviare. In conclusione il raggio emerge perpendicolarmente al raggio incidente SI, come se AB fosse uno specchio a 45° con esso.

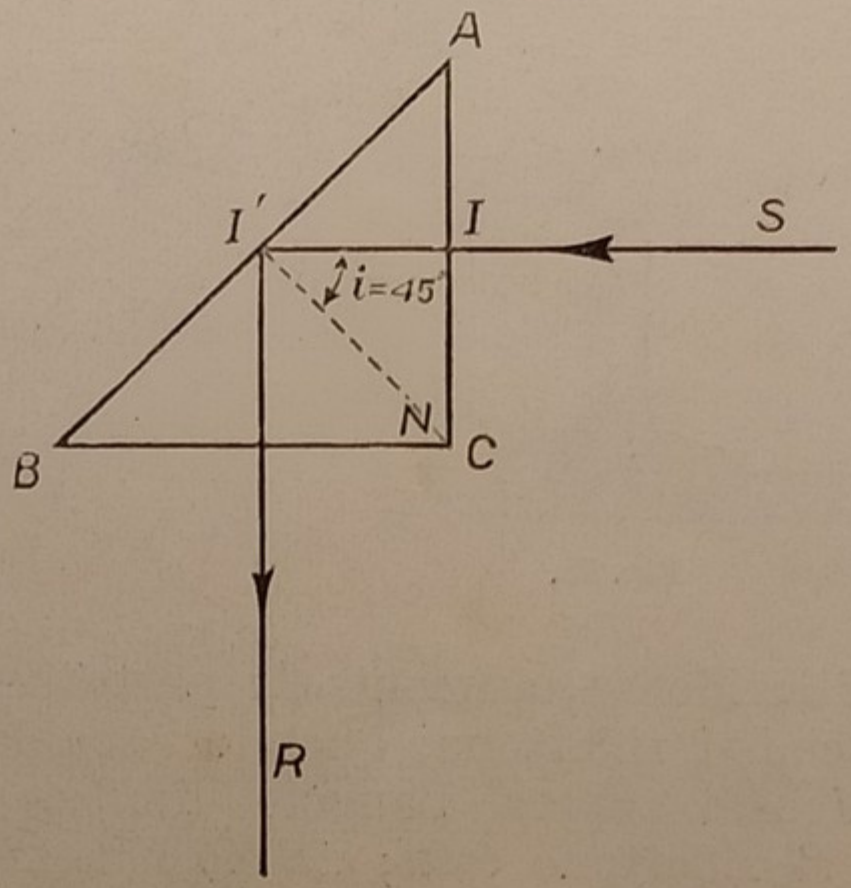


Fig. 69.

Si utilizza questo prisma quando si vogliano ottenere immagini riflesse esenti dalle immagini multiple, che producono gli specchi ordinarî (§ 17).

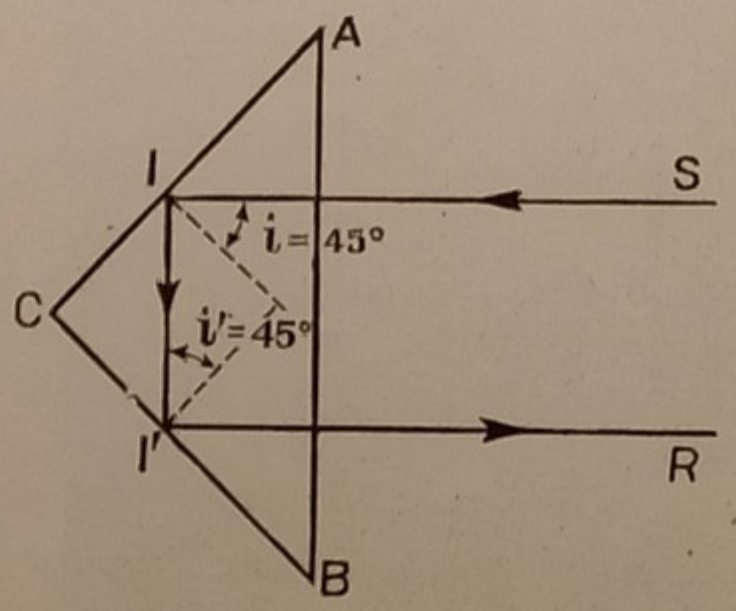


Fig. 70.

Se il raggio luminoso batte sul prisma perpendicolarmente all'ipotenusa AB (Fig. 70), subisce due riflessioni totali in I ed I', e ritorna indietro parallelamente al raggio incidente. Applicheremo quest'altro caso nel *cannocchiale prismatico* (§ 76).

36. **Rifrazione atmosferica.** — L'atmosfera che circonda la terra, non è di densità costante, ma decrescente dal basso all'alto. Un raggio luminoso che l'attraversi, non procederà pertanto in linea retta.

Rappresentiamo in sezione una parte della sfera terrestre, circondata dall'atmosfera (Fig. 71); immaginiamo che questa sia suddivisa in tanti strati concentrici, di spessore piccolissimo, di densità crescente da strato a strato dall'alto in basso, ma costante in tutto uno strato. Un raggio di luce provenga da un astro nella direzione SI; nel punto I passando dal vuoto al primo strato, cioè da un mezzo meno ad uno più rifrangente, devia avvicinandosi alla normale N_1; e successivamente devierà ad ogni passaggio da uno strato al successivo, avvicinandosi alle normali N_2, N_3,... N_5; esso pertanto segue il cammino di una spezzata, o meglio curvilineo, essendo infinitesimi i lati della spezzata; e la curva rivolgerà verso terra la sua concavità.

In tal modo il raggio SI potrà arrivare all'occhio O di una persona, anche se l'astro è ancora sotto l'orizzonte $M\,M'$. Tale persona vedrà l'astro nella direzione OS' della tangente in O alla curva descritta dal raggio; cioè vedrà l'astro al di sopra dell'orizzonte, come se fosse già spuntato.

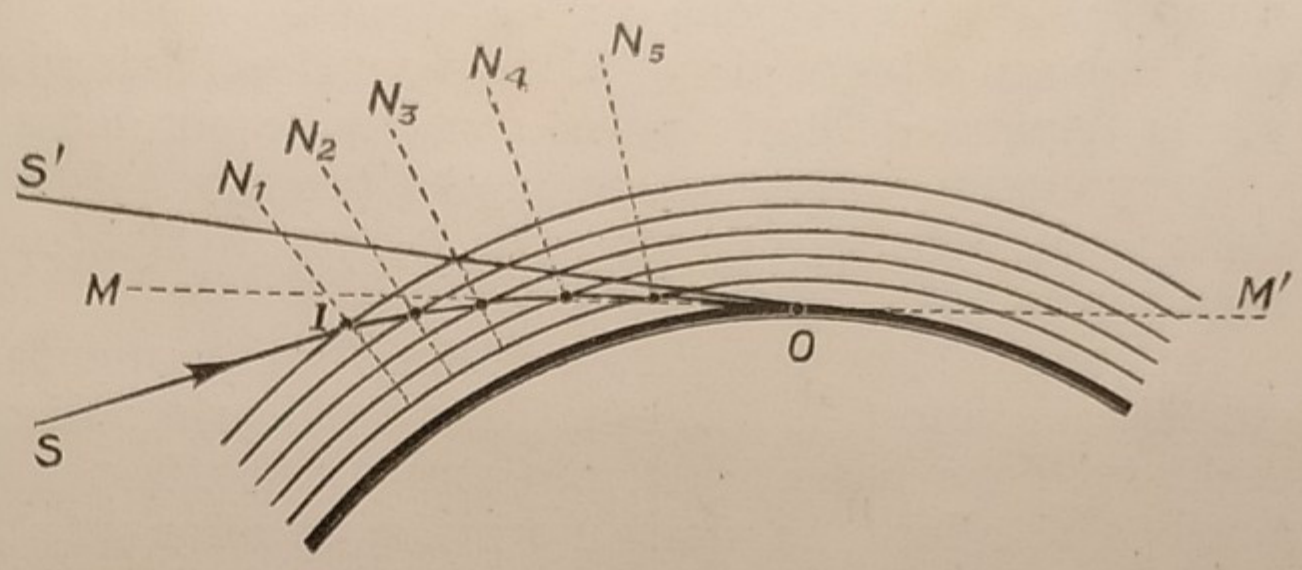


Fig. 71.

Per ciò il Sole al mattino si vede spuntare circa 2 minuti prima ed al tramonto ancora per 2 minuti dopo, di quello che avverrebbe senza l'atmosfera. Se l'astro è allo zenit si vede nella sua posizione reale; poichè in tal caso i raggi luminosi colpiscono gli strati d'aria nella direzione della normale, e non sono deviati.

Per la stessa ragione le montagne ci appaiono un po' più alte che non siano; ed un bastimento lontano sul mare sembra sollevato sull'acqua.

Fig. 72.

37. **Miraggio - Fata morgana.** — Nei deserti si ha qualche volta l'illusione di vedere da lontano gli oggetti come se fossero riflessi dall'acqua, che in realtà non c'è, (Fig. 72). La spiegazione del fenomeno è la seguente:

Il Sole scalda fortemente la sabbia del deserto. L'aria sovrastante non si scalda per il passaggio dei raggi solari che l'attraversano; ciò perchè l'aria essendo trasparente lascia passare i raggi solari senza trattenerli; per la stessa ragione un pezzo di ghiaccio limpido si lascia attraversare dai raggi solari senza fondere. L'aria pertanto si riscalda per conduzione in contatto del terreno caldo; e quindi sarà tanto più calda quanto più vicina al terreno.

Col riscaldamento l'aria si dilata, e diventa meno densa; sicchè in vicinanza del terreno la densità dell'aria *cresce* dal basso in alto, contrariamente a quanto avviene d'ordinario. Ciò sino a pochi decimetri d'altezza, cioè fino all'altezza a cui si fa risentire l'azione riscaldante del terreno; poi la densità dell'aria varia come nelle condizioni normali.

Supponiamo quest'aria vicino al terreno suddivisa in tanti strati sottilissimi, di densità crescente da strato a strato, dal basso in alto, ma costante in tutto uno strato.

Un raggio luminoso AI, proviene obliquamente da un punto A di un oggetto lontano (Fig. 72) e batte in I sul primo di questi strati d'aria anormali; ivi deve passare da uno strato più rifrangente ad uno meno rifrangente e si allontana dalla normale; si allontana ancora successivamente passando negli strati inferiori meno densi. Il raggio quindi non si propaga in linea retta; ma segue una curva che rivolge verso terra la convessità. Contemporaneamente va sempre crescendo l'angolo d'incidenza ($i_1 < i_2 < i_3$) finchè esso supera l'angolo limite; allora avviene in I_1 la riflessione totale, ed il raggio ritorna verso l'alto percorrendo un cammino simmetrico a quello precedente, e può arrivare all'occhio O di una persona lontana, che vedrà il punto A in A' sul prolungamento dell'ultimo tratto. Questa persona vede anche direttamente il punto A per i raggi AO che riceve in linea retta, perchè si propagano fuori degli strati bassi dell'aria riscaldata; quindi vede l'oggetto e la sua immagine, come se invece del suolo vi fosse l'acqua.

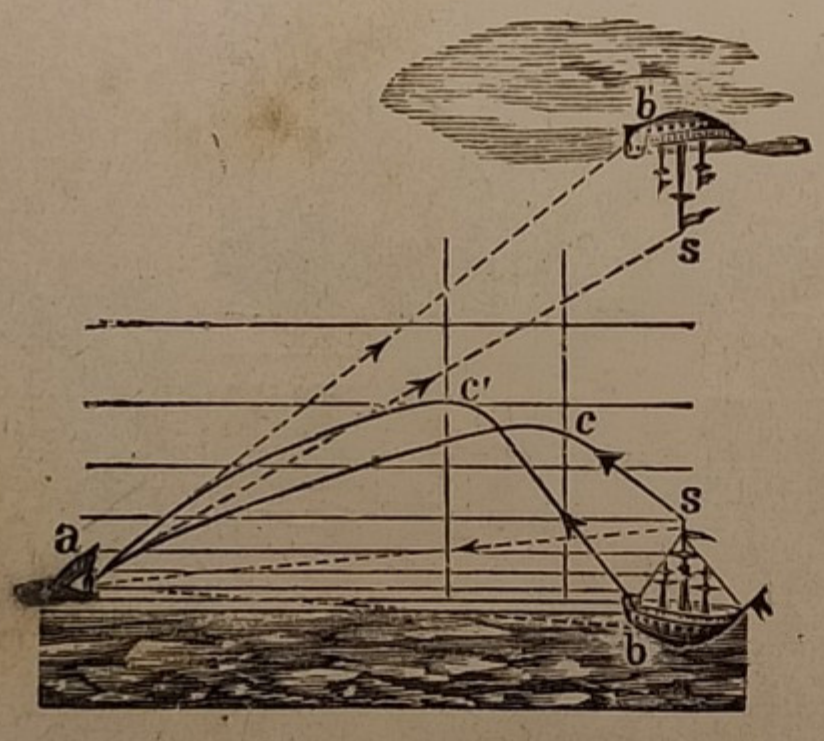


Fig. 73.

L'illusione è completa, perchè l'immagine appare sbiadita e tremolante; poichè gli strati bassi atmosferici non sono in quiete, ma alquanto ondeggianti. Il fenomeno appare da lontano, perchè la variazione di densità dell'aria essendo piccola, l'angolo limite è prossimo a 90°; quindi i raggi incidenti AI devono arrivare quasi orizzontalmente, cioè da lontano.

Qualche volta il ripiegamento dei raggi avviene quando la superficie riscaldata sia la costa di una montagna; oppure negli strati superiori dell'atmosfera, come mostra la Fig. 73. Ciò perchè in alto si forma un punto d'inversione di densità, per cause di temperatura, alle quali accennammo altrove, (Vol. 1° - § 342). In questo caso l'immagine viene riflessa in alto, ed appare deformata; sembra così di vedere librati nel cielo oggetti fantastici che realmente non vi sono. Il fenomeno prende il nome di **fata morgana**; celebre è quella che si osserva talvolta nello stretto di Messina.

38. **Rifrazione attraverso una lastra.** — Chiamasi lastra un mezzo trasparente, limitato da facce piane e parallele; *spessore* della lastra è la distanza tra le due facce.

Supponiamo che la lastra sia immersa nello stesso mezzo omogeneo. Sia AI un raggio di luce incidente su una faccia LM (Fig. 74); passando da

un mezzo meno rifrangente (p. es. aria) ad uno più rifrangente (p. es. vetro), il raggio si avvicina alla normale PP', e devia nella direzione II_1. In I_1 dovendo ritornare nel 1° mezzo meno rifrangente, si allontana dalla normale QQ' ed emerge nella direzione I_1R. S'intuisce, e l'esperienza conferma, che di quanto il raggio si avvicina alla normale entrando nella lastra, di altrettanto se ne allontana uscendone; cioè:

il raggio emergente I_1R è parallelo al raggio incidente AI.

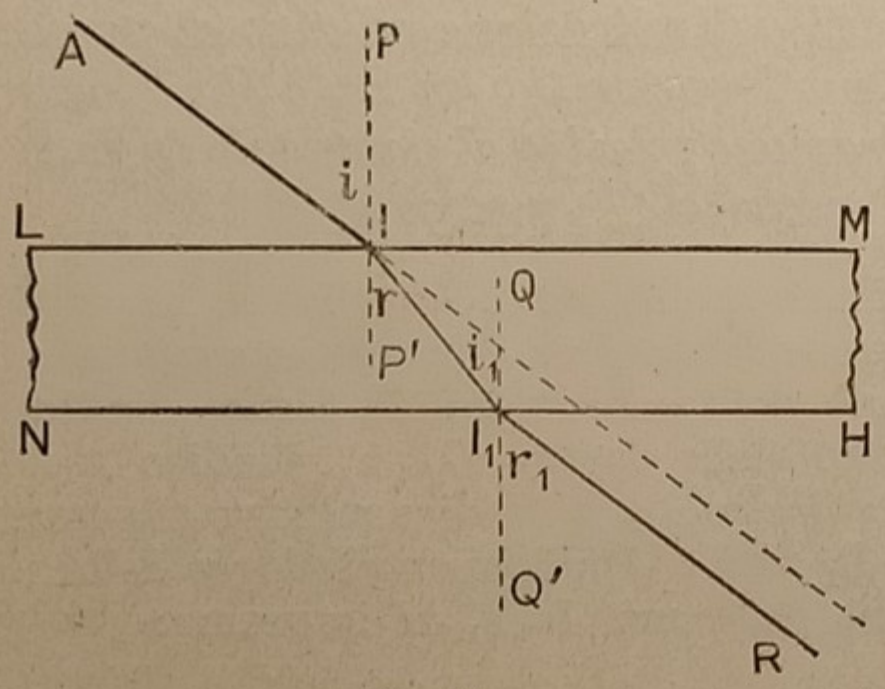


Fig. 74.

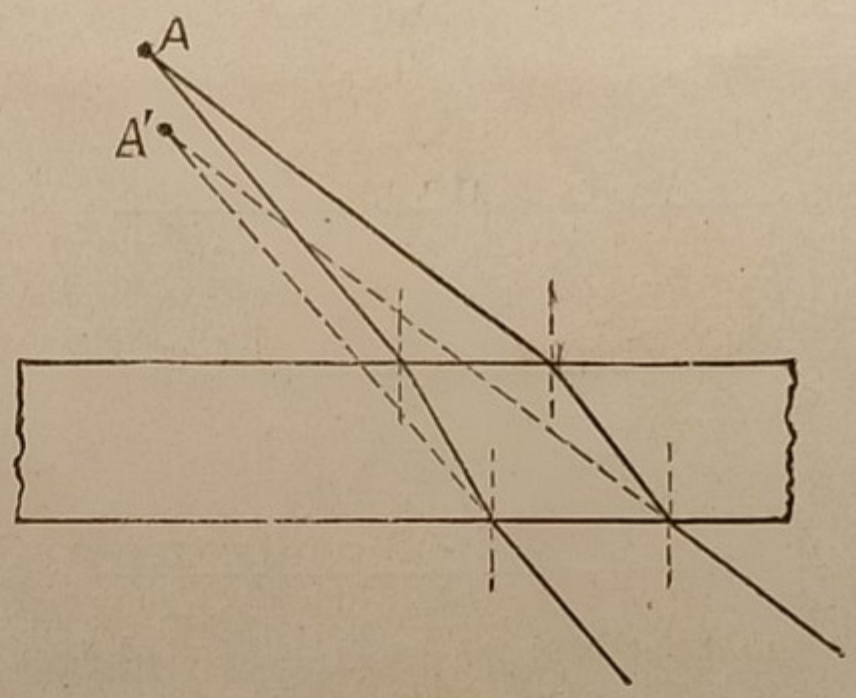


Fig. 75.

La lastra dunque *sposta* i raggi ma *non li devia*; intendendosi per deviazione una variazione di direzione, cioè uno spostamento angolare. Ne consegue che se sulla lastra cade un fascio di raggi paralleli, esce ancora un fascio di raggi paralleli nella medesima direzione; cioè l'occhio che li riceve non percepisce differenza, vi sia o non vi sia la lastra. Così, guardando una stella (praticamente a distanza infinita) e poi interponendo avanti all'occhio una lastra, non si vede spostamento nella posizione della stella.

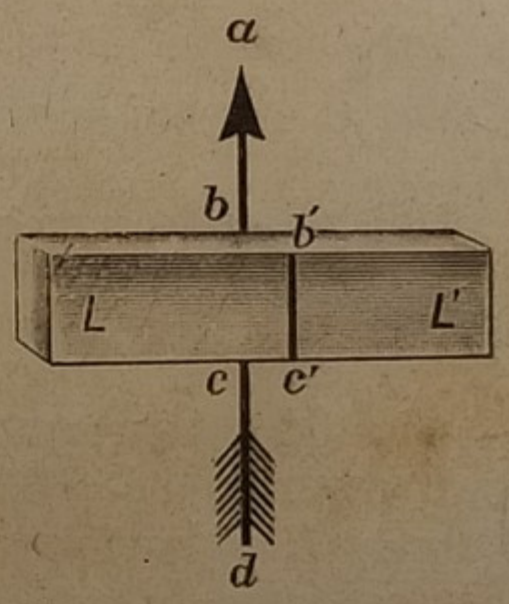


Fig. 76.

La cosa è diversa se i raggi provengono da un punto vicino A, (Fig. 75). In questo caso i raggi emergenti, pur essendo rispettivamente paralleli a quelli incidenti, escono in direzione tale che l'occhio li percepisce come se venissero da A'; cioè A si vede in A'. Così, di un oggetto ad posto dietro la lastra LL' (Fig. 76), la parte bc si vede spostata in $b'c'$.

Chiamiamo *spostamento* la distanza tra il raggio incidente e quello emergente; esso è funzione dallo spessore s della lastra, dall'angolo d'incidenza i, e dall'indice di rifrazione relativo ai due mezzi che la luce attraversa.

39. **Relazione tra gli indici di rifrazione.** — Sia n l'indice di rifrazione relativo al passaggio della luce dal mezzo in cui è immersa la lastra, al mezzo di cui è formata la lastra; sia n_1 l'indice di rifrazione relativo al passaggio inverso dalla lastra al mezzo ambiente.

Applicando la legge della rifrazione in I ed I_1 (Fig. 74), avremo:

4) $\qquad \operatorname{sen} i = n \operatorname{sen} r; \qquad \operatorname{sen} i_1 = n_1 \operatorname{sen} r_1.$

Essendo I_1R parallela ad AI, è: $i_1 = r$ ed $r_1 = i$; sostituiamo nella 2ª delle 4):

5) $\qquad \operatorname{sen} i = n \operatorname{sen} r\,; \qquad \operatorname{sen} r = n_1 \operatorname{sen} i.$

Moltiplicando membro a membro e semplificando, si ricava:

6) $\qquad n n_1 = 1\,; \qquad$ ossia: $\qquad n_1 = \dfrac{1}{n}\,.$

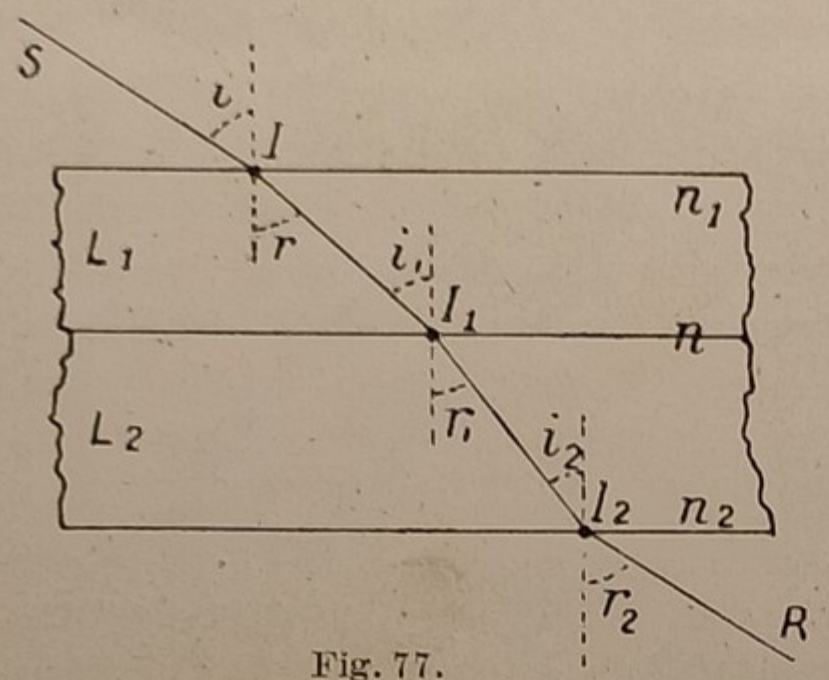


Fig. 77.

Rimane così confermato che: *se* n *è l'indice di rifrazione relativo al passaggio da un 1° mezzo ad un 2°, è 1/n l'indice di rifrazione relativo al passaggio inverso dal 2° mezzo al 1° mezzo*, (§ 32).

Siano ora L_1 ed L_2 due lastre di sostanza diversa, aventi una faccia in comune, e immerse nel vuoto, (Fig. 77). Sia n_1 l'indice assoluto della lastra L_1, n_2 l'indice assoluto della lastra L_2, n l'indice relativo al passaggio da L_1 ad L_2. Applichiamo la legge della rifrazione nei punti I - I_1 - I_2; avremo:

7) $\qquad \operatorname{sen} i = n_1 \operatorname{sen} r\,; \qquad \operatorname{sen} i_1 = n \operatorname{sen} r_1\,; \qquad \operatorname{sen} i_2 = \dfrac{1}{n_2} \operatorname{sen} r_2.$

Anche ora s'intuisce, e l'esperienza conferma, che il raggio incidente SI ed il raggio emergente I_2R sono paralleli; quindi:

$$r = i_1; \qquad r_1 = i_2; \qquad r_2 = i.$$ Sostituendo nelle 7) si ha:

$$\operatorname{sen} i = n_1 \operatorname{sen} r\,; \qquad \operatorname{sen} r = n \operatorname{sen} r_1\,; \qquad \operatorname{sen} r_1 = \frac{1}{n_2} \operatorname{sen} i\,.$$

Moltiplicando membro a membro e semplificando, si ottiene:

$$1 = n \frac{n_1}{n_2}\,; \qquad \text{ossia:} \qquad n = \frac{n_2}{n_1}\,.$$

Ciò dimostra quanto si era asserito al § 32, che: *l'indice di rifrazione relativo al passaggio da un mezzo ad un altro, è uguale al rapporto tra l'indice assoluto del 2° mezzo e l'indice assoluto del 1° mezzo.*

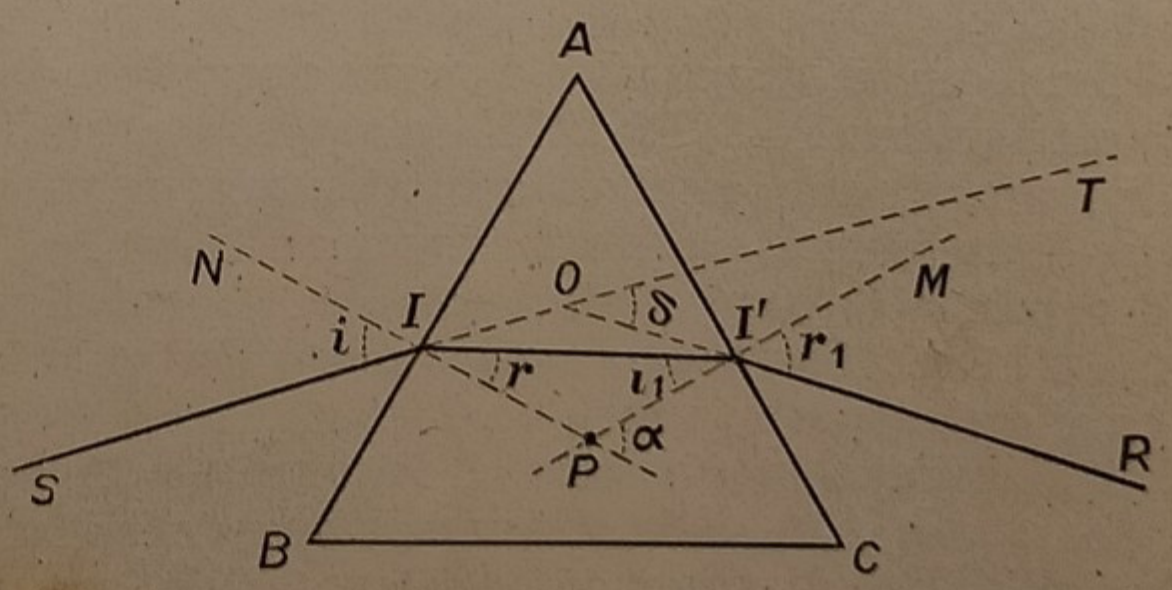


Fig. 78

40. **Prisma.** — Chiamiamo **prisma ottico** un mezzo trasparente, limitato da due facce piane, non parallele. L'angolo di queste si chiama *angolo rifrangente* del prisma: può variare da 0° a 180°. Praticamente consideriamo il prisma limitato da una terza faccia, per quanto questa non occorra per il nostro studio.

Consideriamo una sezione normale ABC del prisma, (Fig. 78). Sia $\widehat{BAC}$ la sezione dell'angolo rifrangente ed SI un raggio incidente sulla faccia AB, nel piano della sezione considerata; passando da un mezzo meno rifrangente ad un altro più rifrangente, si avvicina alla normale NP e prenderà la direzione II'. In I' deve ritornare nel 1° mezzo, meno rifrangente, e si allontanerà dalla normale MP, uscendo nella direzione $I'R$. Il raggio pertanto subisce due deviazioni, che concordantemente lo fanno deviare verso la base BC. Il raggio $I'R$ si chiama il *raggio emergente*; esso forma col raggio incidente un angolo $\delta = \widehat{TOR}$, che si chiama la **deviazione del prisma.**

Applicando la legge della rifrazione ai raggi incidenti SI ed II', si hanno le due relazioni:

8) $$\operatorname{sen} i = n \operatorname{sen} r\,; \qquad \operatorname{sen} i_1 = \frac{1}{n} \operatorname{sen} r_1\,.$$

Inoltre l'angolo α, esterno al triangolo PII', è uguale alla somma dei due angoli interni non adiacenti: $\alpha = r + i_1$, ed è anche $\alpha = \widehat{A}$ perchè entrambi supplementari all'angolo IPI', quindi:

9) $$\widehat{A} = r + i_1.$$

Parimenti l'angolo δ esterno al triangolo IOI' è: $\delta = \widehat{OII'} + \widehat{OI'I}$.

Ma $\widehat{OII'} = \widehat{OIP} - \widehat{I'IP} = i - r$; $\widehat{OI'I} = \widehat{OI'P} - \widehat{II'P} = r_1 - i_1$; quindi sostituendo:

10) $$\delta = i - r + r_1 - i_1; \qquad \text{o anche, per la 9):} \qquad \delta = i + r_1 - \widehat{A}.$$

L'ultima eguaglianza dice che:

la deviazione del prisma è la somma dell'angolo d'incidenza con l'angolo di emergenza, diminuita dell'angolo rifrangente.

Le 8) – 9) – 10) sono quattro equazioni, che permettono di eliminare le tre incognite $r - i_1 - r_1$; rimane una relazione tra δ ed $\widehat{A} - n - i$; cioè δ è funzione delle variabili $\widehat{A} - n - i$:

11) $$\delta = f(\widehat{A}, n, i).$$

Non ricaviamo la forma di tale funzione.

Problema. — *Sopra una faccia di un prisma di flint, il cui angolo rifrangente è di 60°, cade un raggio luminoso con un'incidenza di 45°. Calcolare l'angolo di emergenza e la deviazione.*

Soluzione. — Dalle 8) - 9) - 10), coi dati del problema: $i = 45°$; $n = 1{,}630$; $\widehat{A} = 60°$; si ha:

$\operatorname{sen} 45° = 1{,}630 \operatorname{sen} r$; $\operatorname{sen} r_1 = 1{,}630 \operatorname{sen} i_1$; $60° = r + i_1$; $\delta = 45° - r + r_1 - i_1$.

Dalla prima di esse si ricava:

$$\operatorname{sen} r = \frac{\operatorname{sen} 45°}{1{,}630} = \frac{0{,}70\,711}{1{,}630} = 0{,}43\,381\,; \qquad \text{da cui:} \qquad r = 25° 42' 35''.$$

Dalla terza allora si ha: $i_1 = 60° - r = 34° 17' 25''$; e dalla seconda:

$\operatorname{sen} r_1 = 1{,}630 \times \operatorname{sen} 34° 17' 25'' = 1{,}630 \times 0{,}56\,334 = 0{,}91\,824$; da cui:

$r_1 = 55° 56' 7''$. E infine dalla quarta equazione:

$\delta = 45° - 25° 42' 35'' + 55° 56' 7'' - 34° 17' 25'' = 40° 56' 7''$.

Riepilogando, gli angoli richiesti sono:

$$\mathbf{r_1 = 55° 56' 7''} \qquad\qquad \mathbf{\delta = 40° 56' 7''}.$$

41. **Leggi della deviazione del prisma.** — Si dimostra con l'esperienza:

1. La deviazione aumenta col crescere dell'angolo rifrangente. Infatti se anzichè $\widehat{BAC}$ l'angolo rifrangente fosse $\widehat{BAD}$ (Fig. 79), il raggio rifratto II_2 formerebbe in I_2 un angolo d'incidenza $i_2 > i_1$, ed emergerebbe da I_2 con una deviazione maggiore che da I_1, $(\delta_2 > \delta_1)$.

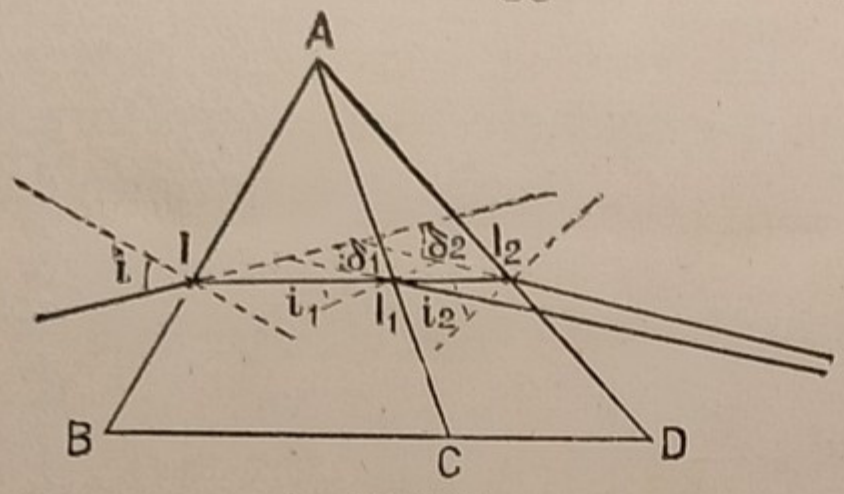


Fig. 79.

Per la verifica sperimentale si diriga un fascio di raggi SI su uno schermo M, su cui si forma una macchia di luce A, (Fig. 80). S'interponga sul cammino dei raggi un prisma P, con un angolo rifrangente, ad es., di 45°; si vedrà la macchia spostarsi da A a B. Si giri lo stesso prisma in modo che l'angolo rifrangente sia ora di 90° (Fig. 81); si vedrà la luce spostarsi maggiormente in C.

2. La deviazione aumenta col crescere dell'indice di rifrazione della sostanza del prisma. Infatti, se ad un prisma di dato indice di rifrazione n se

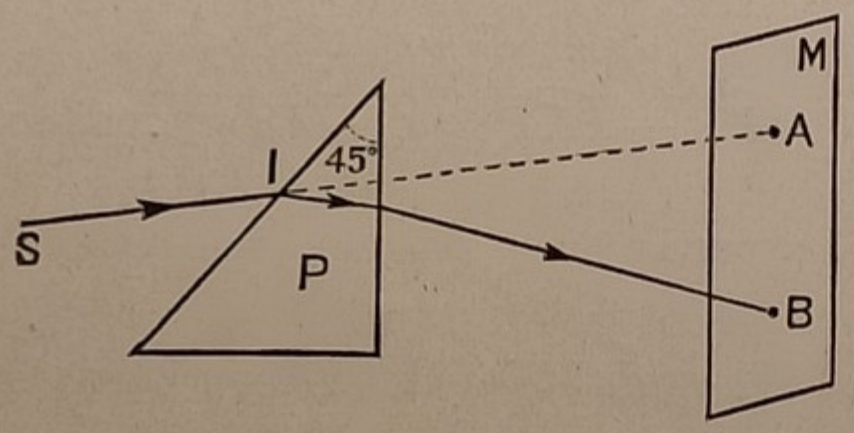


Fig. 80.

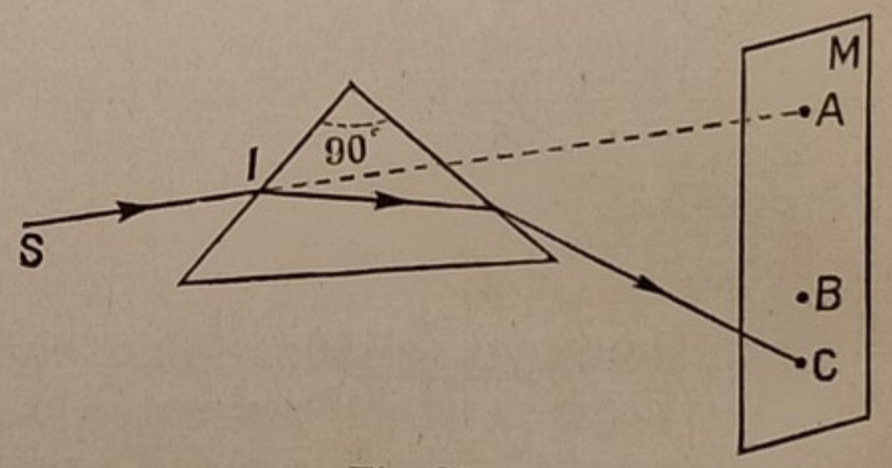


Fig. 81.

ne sostituisce un altro di eguale angolo rifrangente, ma di indice maggiore n', vuol dire che il raggio rifratto anzichè la direzione II' prenderà una direzione più deviata II'' (Fig. 82); l'angolo d'incidenza su AC cresce quindi col crescere di n, $(i_2 > i_1)$, e crescerà pertanto anche la deviazione all'uscita del raggio da AC.

La verifica sperimentale si fa col **poliprisma,** che è un prisma formato di più strati $s_1\ s_2\ s_3$.... di cristallo diverso (Fig. 83), cioè d'indice di rifrazione diverso; ma aventi tutti lo stesso angolo rifrangente; infatti tali strati sovrapposti compongono uno stesso prisma. Dirigendo su una faccia un fascio di raggi paralleli, cioè con lo stesso angolo d'incidenza sulle varie sezioni, si forma sullo schermo S una serie di macchie luminose $M_1 M_2 M_3$.... in posizione diversa. La luce che ha attraversato le varie sezioni è stata dunque diversamente deviata.

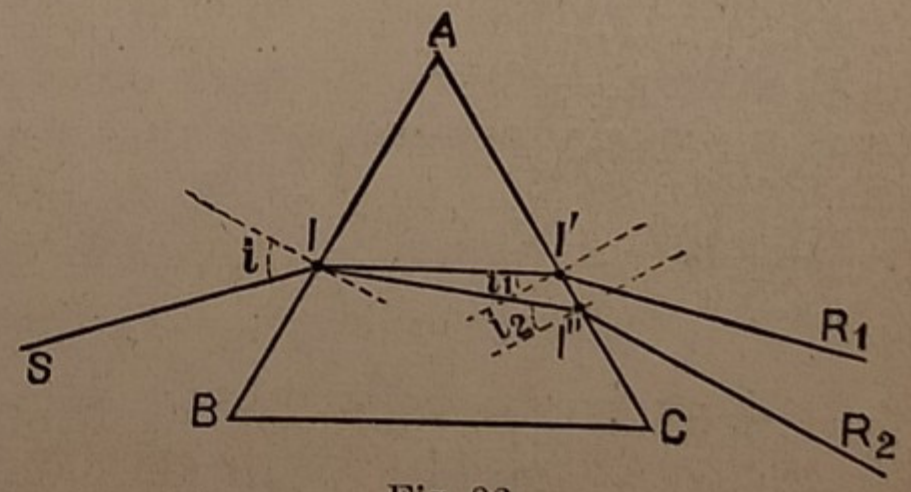


Fig. 82.

3. Aumentando l'angolo d'incidenza, la deviazione dapprima diminuisce, acquista un valore minimo, e poi cresce. Si faccia ruotare con continuità un prisma dalla posizione della Fig. 84 $(i = 0°)$, a quella della Fig. 85 $(i = 90°)$; si vedrà la macchia di luce sullo schermo dapprima accostarsi

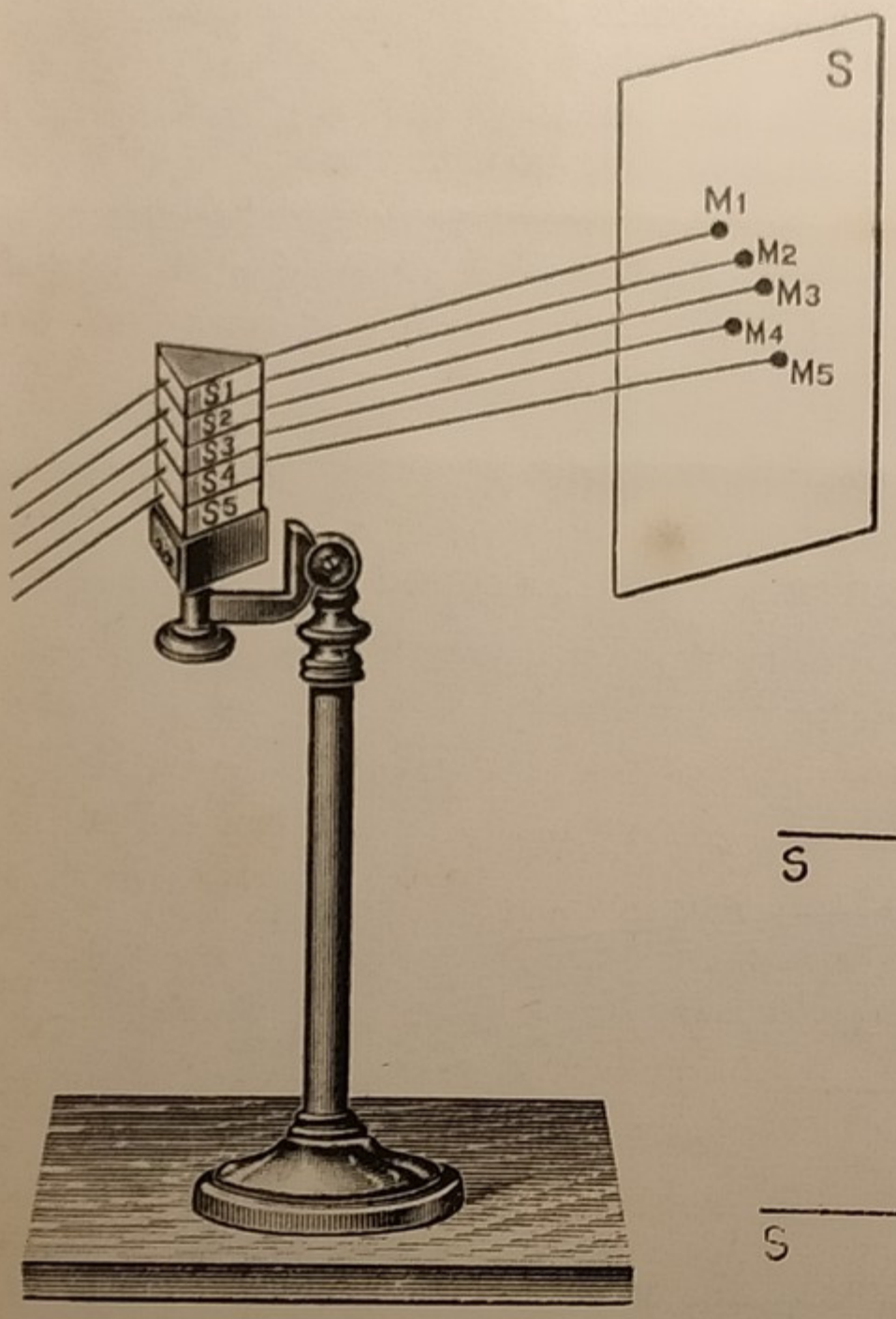


Fig. 83.

ad A, raggiungere una posizione M_1 e poi ritornare ad allontanarsi. Vi è perciò per ogni prisma, un **angolo di deviazione minima.**

Si dimostra col calcolo, che allorchè il prisma è alla deviazione minima, l'angolo d'incidenza i e quello d'emergenza r_1 (Fig. 78), sono eguali; cioè: *il raggio incidente e quello emergente, sono egualmente inclinati sulle rispettive facce del prisma.*

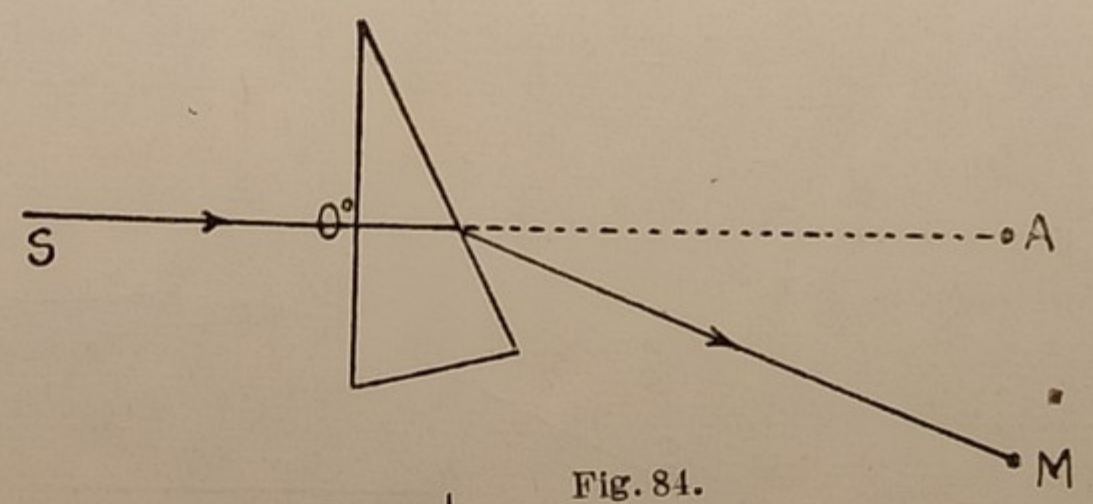


Fig. 84.

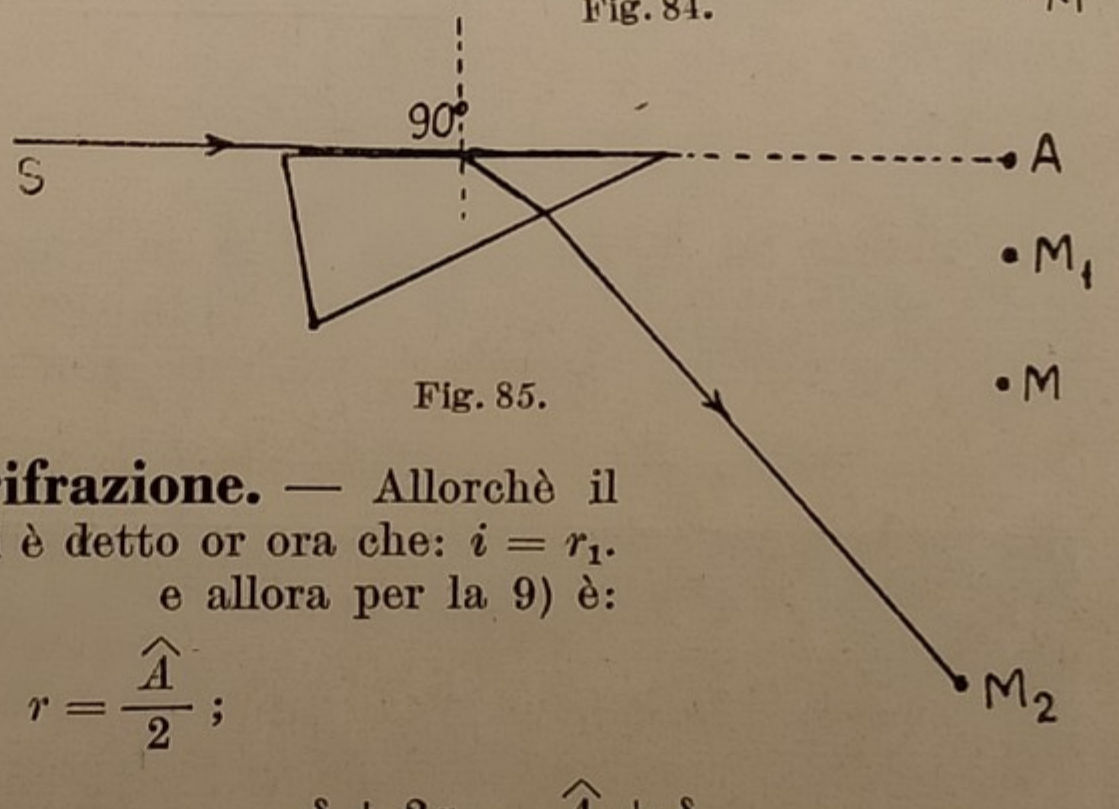


Fig. 85.

42. **Misura dell'indice di rifrazione.** — Allorchè il prisma è alla deviazione minima, si è detto or ora che: $i = r_1$. È quindi anche: $r = i_1$; e allora per la 9) è:

$$\widehat{A} = 2r, \quad \text{da cui:} \quad r = \frac{\widehat{A}}{2};$$

e per la 10): $\delta = 2(i - r)$, da cui: $i = \dfrac{\delta + 2r}{2} = \dfrac{\widehat{A} + \delta}{2}$.

Sostituendo nella 1ª delle 8) si ricava:

12) $$n = \operatorname{sen} \frac{\widehat{A} + \delta}{2} : \operatorname{sen} \frac{\widehat{A}}{2};$$

che permette di ricavare il valore dell'indice di rifrazione n dalla misura sperimentale dell'angolo rifrangente del prisma e della deviazione minima.

Problemi da risolvere.

1. Calcolare l'angolo limite per un raggio luminoso che passa dal flint all'acqua.

2. Un raggio incidente fisso, facente un angolo di 45° colla verticale, penetra dall'aria in un strato d'acqua di 5 cm. di spessore, sovrastante un bagno di mercurio. La luce si riflette sul mercurio ed esce dall'acqua secondo una retta a. Quale deve essere lo spessore d'uno strato di solfuro di carbonio, sostituito all'acqua, perchè il raggio emergente sia sulla stessa retta a?

3. Un raggio di luce passa dall'aria nell'alcool; calcolare il massimo angolo di rifrazione.

4. Un raggio luminoso cade su una faccia di una lastra di crown, spessa cm. 2, con un'incidenza di 45°. Calcolare lo spostamento del raggio emergente.

5. L'angolo rifrangente di un prisma è di 60°; la deviazione minima si ottiene per un angolo d'incidenza di 60°. Calcolare l'indice di rifrazione della sostanza di cui è formato il prisma.

Dispersione della luce.

43. **Scomposizione della luce bianca.** — Tutte quante le considerazioni precedenti presuppongono che il raggio luminoso sia di un solo colore; cioè un raggio di *luce semplice* o **monocromatica.**

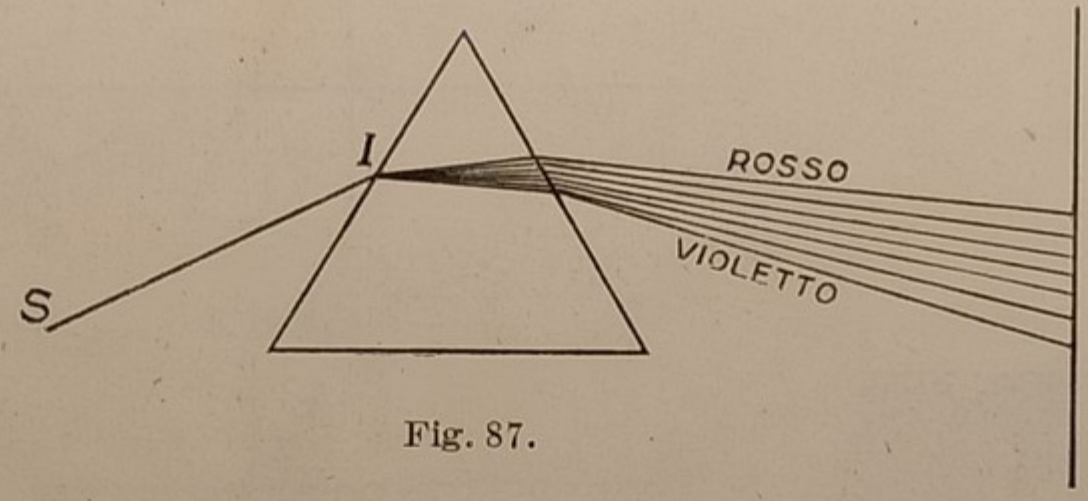


Fig. 87.

Se invece su di un prisma cade un raggio SI di luce bianca, come è quella solare (Fig. 87), esso non solo devia; ma si scompone in *infiniti* raggi diversamente colorati, tra cui Newton[1] ne contò sette principali:

rosso, *aranciato*, *giallo*, *verde*, *azzurro*, *indaco*, *violetto*.

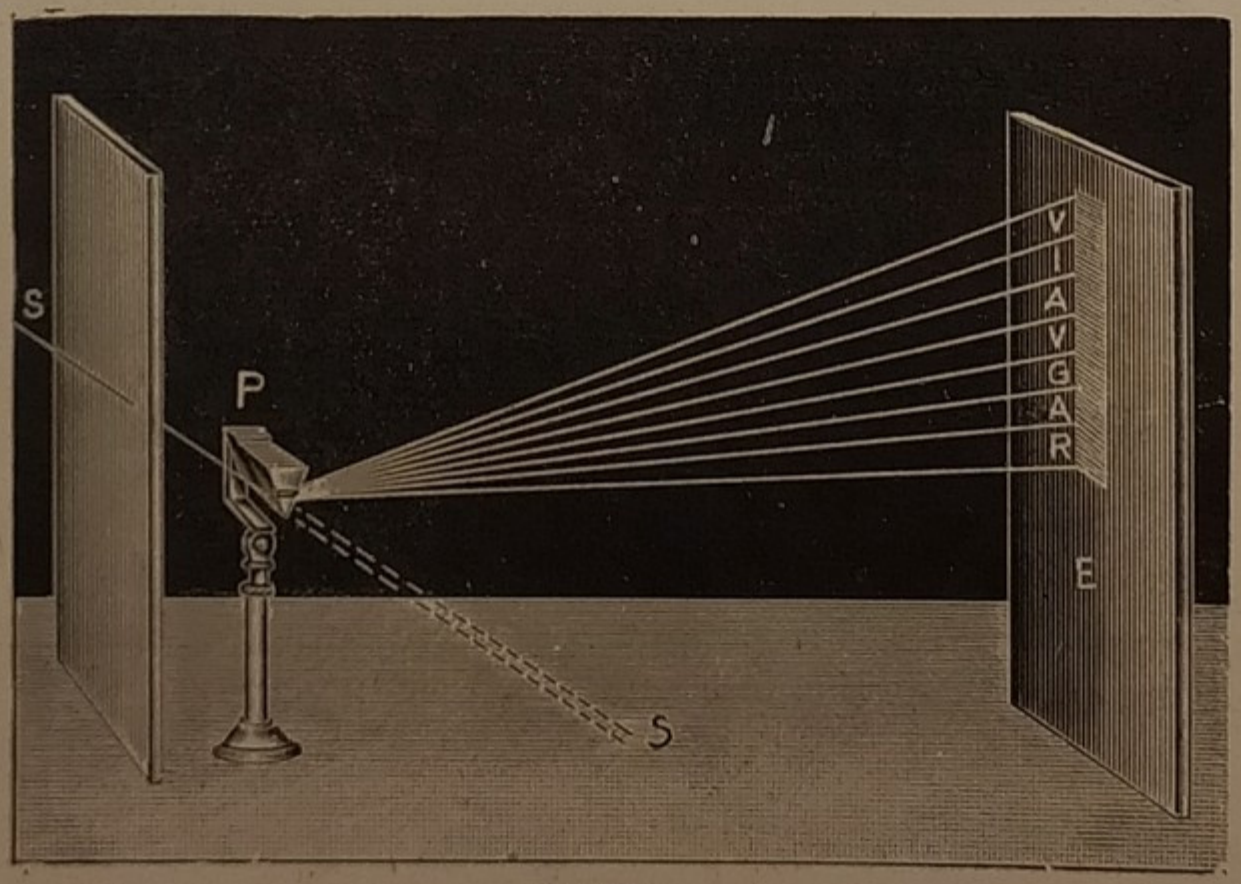


Fig. 88.

Raccogliendo tali raggi su uno schermo, come indica la Fig. 88, si forma una striscia[2] variamente colorata, dal rosso R al violetto V, che si chiama lo *spettro solare*; riprodotta con approssimazione nella Fig. 89.

Questo fenomeno si chiama la **dispersione della luce.** La sua spiegazione sta nel fatto che la luce bianca è *composta* di tutti i suddetti raggi colorati dello

(1) Newton Isacco, fra i più grandi scienziati dell'umanità; n. a Whoolsthorpe il 5 gennaio 1642, m. a Kensington il 31 marzo 1727.

(2) Per l'esperienza si fa uso di un fascio di luce solare che attraversa una sottile fenditura, parallela agli spigoli laterali del prisma.

spettro. Questi *sono diversamente deviati* dal prisma; cioè l'indice di rifrazione del prisma e quindi la deviazione di esso, dipendono dalla natura del raggio colorato; i raggi rossi sono i meno deviati ed i violetti i più deviati; i varî raggi perciò si separano gli uni dagli altri.

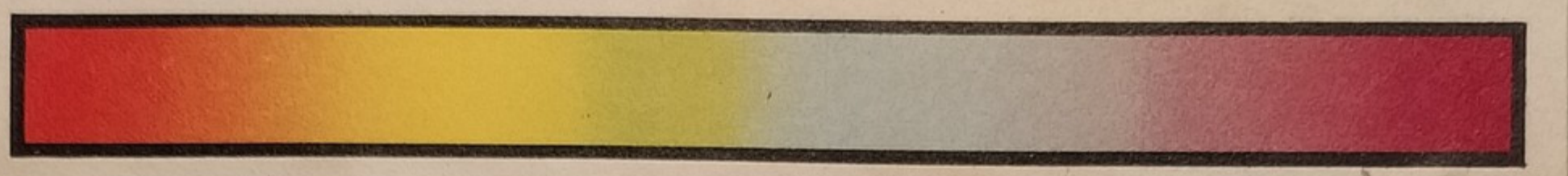


Fig. 89.

44. **Ricomposizione della luce bianca.** — Una riprova di ciò si ha con la *ricomposizione* o sintesi della luce; se i raggi colorati che escono dal prisma si raccolgono su una *lente* (Fig. 90), essa (come studieremo presto) li concentra, li raccoglie in uno stesso punto, ove si vede la luce bianca.

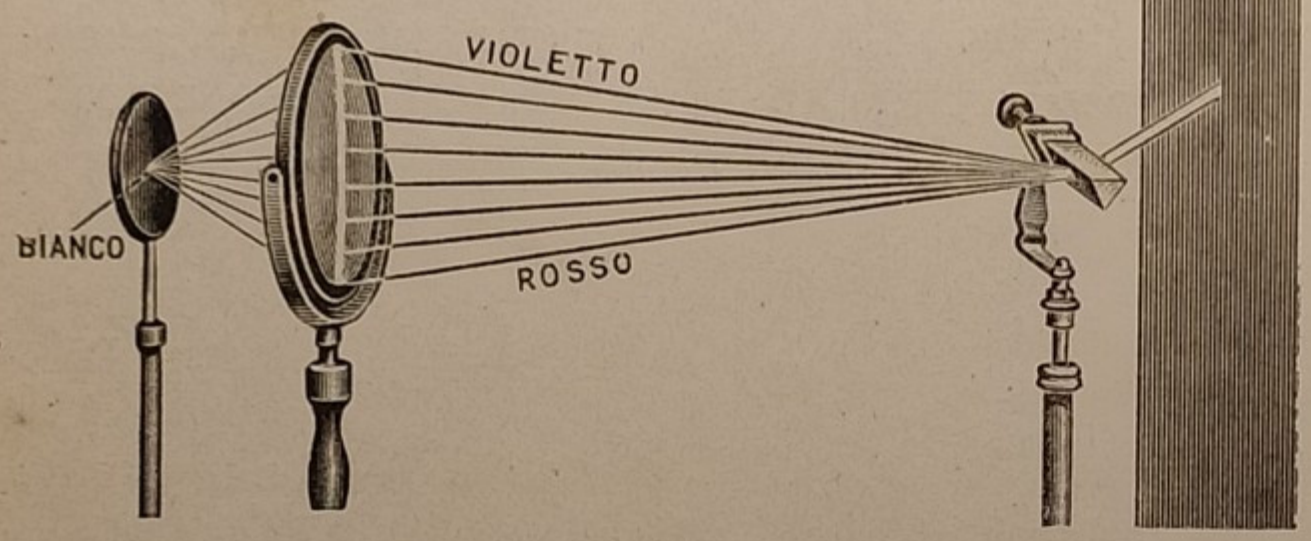


Fig. 90.

Un'altra esperienza è quella del **disco di Newton.** Su un disco di cartone *D*, rappresentato separatamente in *E* (Fig. 91), si dipingono varî settori coi colori dello spettro solare; indi si fa girare rapidamente questo disco attorno al suo asse. Per la *persistenza delle immagini sulla retina* (§ 61), i varî colori si fondono insieme in una sensazione unica, che è di *luce bianca*; cioè il disco si scorge con una tinta uniforme e bianca.

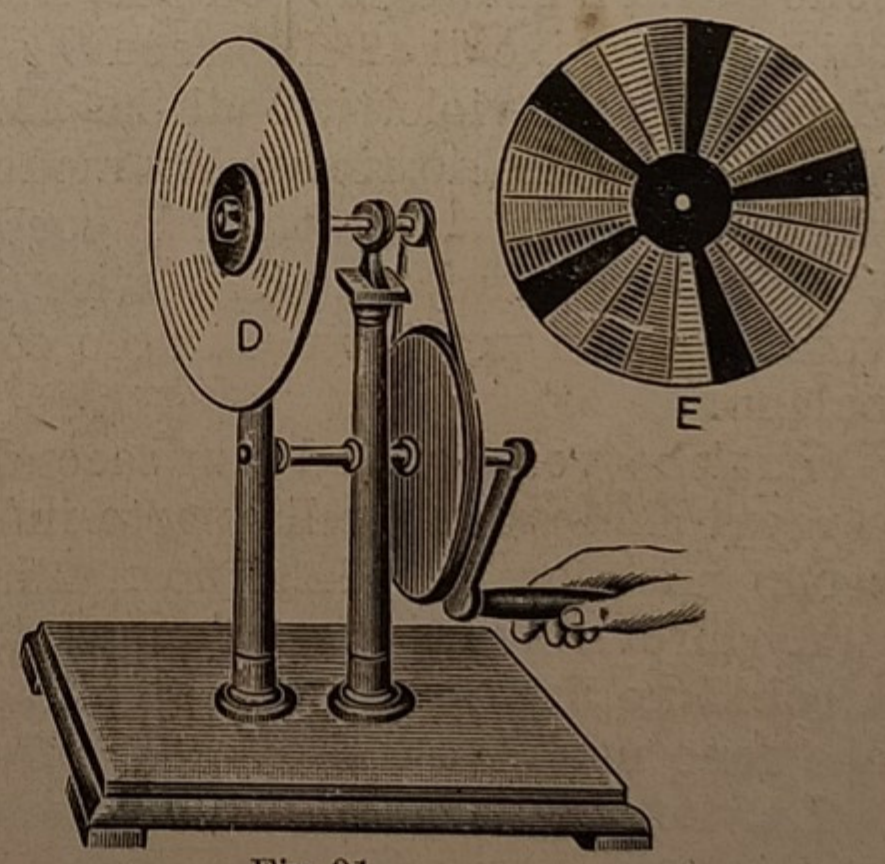


Fig. 91.

45. **Arcobaleno.** — Ora abbiamo gli elementi per spiegare l'**arcobaleno**, che è certamente uno dei più belli fenomeni della Natura.

Dopo la pioggia, se si affaccia il Sole e questo è basso all'orizzonte, guardando nel cielo *col Sole alle spalle*, si scorge un grande arco luminoso, coi colori dello spettro solare, col rosso all'esterno e il violetto all'interno, (Fig. 92).

La spiegazione del fenomeno è la seguente, dovuta a Descartes: Dopo la pioggia rimangono sospese nell'aria minutissime goccioline d'acqua; consideriamone una che rappresentiamo in sezione nella Fig. 93, molto ingrandita. Un fascio di raggi solari *SI* che colpisce la goccia nella parte superiore,

entrando, in piccola parte si riflette secondo IT; in massima parte entra nella goccia e devia nella direzione IA; in A in piccola parte si rifrange secondo AD ed esce dalla goccia; in gran parte si riflette secondo AB; in B in parte si rifrange ed esce nella direzione BO. Un osservatore in O riceverà questo raggio come se pervenisse dal punto R.

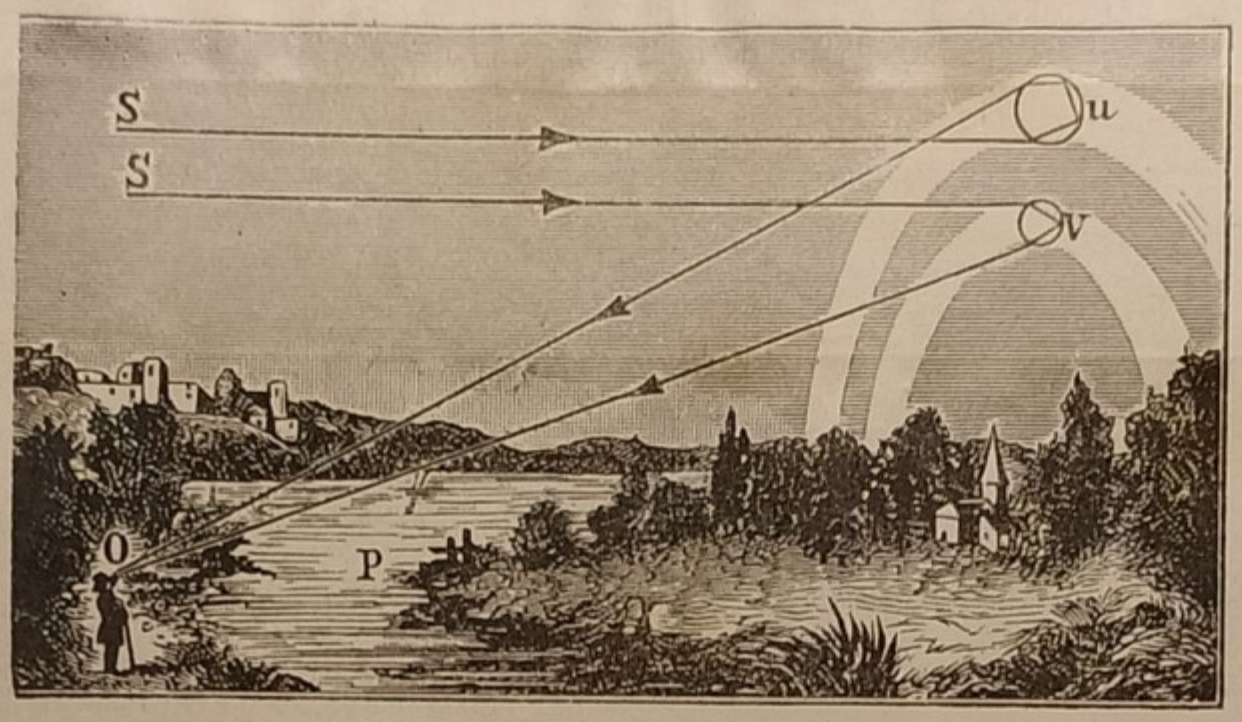


Fig. 92.

Ma in I oltre alla deviazione avviene la scomposizione della luce bianca nei suoi colori; dalla goccia quindi escono varî raggi colorati da BO rosso a CO violetto; l'osservatore vedrà perciò un punto rosso R *sopra* e un punto violetto V *sotto*; ed in mezzo i colori intermedi.

Nella goccia però entrano varî altri raggi paralleli ad SI, che colpiscono la goccia con diversa incidenza; essi emergono in infinite direzioni, e sparpagliati, in modo che l'occhio non ha una sufficiente impressione dei colori; esso percepisce più intensamente quei raggi che sono vicini alla deviazione minima. Il calcolo dimostra che tali raggi efficaci sono quelli il cui angolo con OR, cioè coi raggi rossi, è di 42° 18′ e con OV', cioè coi raggi violetti, è di 40° 23′. Parimenti l'occhio riceverà i medesimi raggi colorati da tutte le gocce che sono su di un cono di vertice O, e di cui OR è una generatrice; quindi vedrà i colori per tutto un arco contenuto su tale cono; cioè vedrà l'arcobaleno.

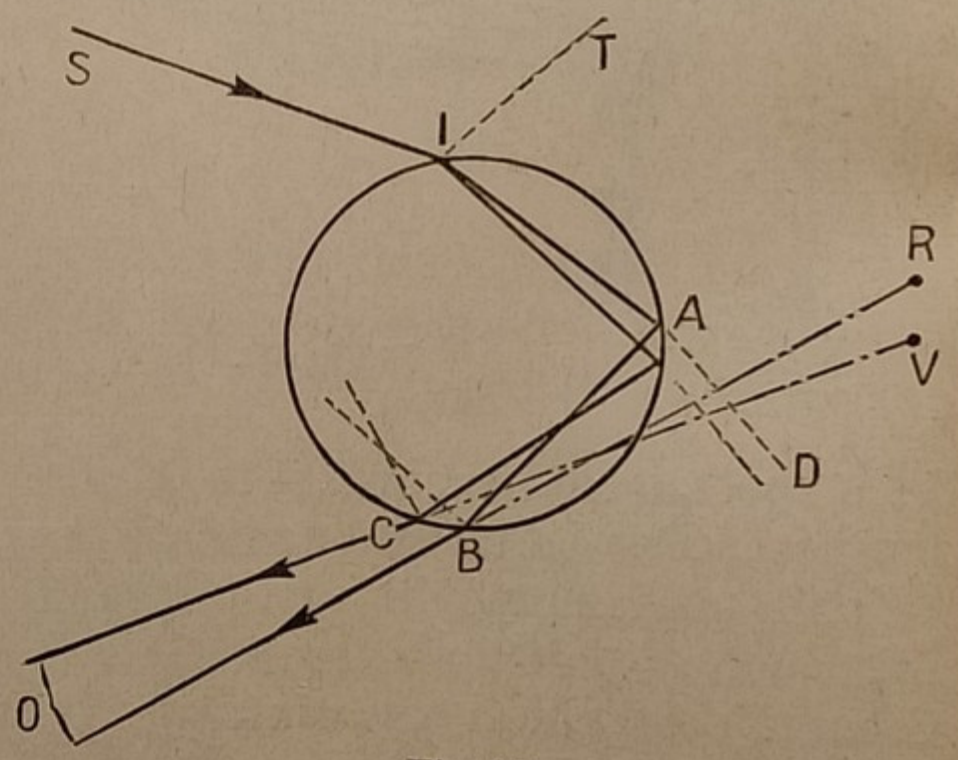


Fig. 93.

Qualche volta si vede un secondo arcobaleno, esterno al primo, dovuto a raggi che cadono nella parte inferiore di una goccia U (Fig. 92) e subiscono una doppia riflessione nell'interno di essa.

A riprova della spiegazione suddetta, notiamo che si può osservare un arcobaleno limitato, tutte le volte che il Sole batte sulle goccioline d'acqua che sono negli spruzzi di alcune fontane, o nelle cascate e simili.

La vivezza dei colori dell'arcobaleno, dipende dalle dimensioni delle gocce d'acqua che lo producono. I colori più vivi si hanno con gocce del diametro di 1 a 0,5 mm. Con l'impicciolirsi delle gocce i colori sbiadiscono; se il loro diametro è minore di 0,05 mm, l'arcobaleno si trasforma in un arco di luce bianca vivissima.

Problemi da risolvere.

1. Un fascio di raggi solari batte su un prisma di flint, il cui angolo rifrangente è di 60° e con un'incidenza di 45°. Essendo $n_1 = 1{,}625$ ed $n_2 = 1{,}671$ gl'indici di rifrazione per i raggi rosso e violetto, calcolare la lunghezza dello spettro su uno schermo a m. 2 di distanza dal prisma.

2. Calcolare, per i valori di n dell'esercizio precedente, l'angolo limite aria-flint per i raggi rossi e violetti.

Lenti.

46. **Lenti.** — Dopo tutti i casi possibili di rifrazione attraverso mezzi limitati da superfici piane, dobbiamo ora studiare il passaggio della luce attraverso mezzi limitati da superfici curve.

Si chiama **lente** un mezzo trasparente limitato da superfici curve, di cui una può essere piana. Noi studieremo solo le **lenti sferiche**; cioè quelle di cui le facce curve sono parte di superficie sferica. Esse sono di due categorie: **convergenti o divergenti,** a secondo che convergono in un punto, o divergono, un fascio di raggi paralleli. Ciascuna di queste categorie si suddivide in tre specie, delle quali diamo le sezioni ed i nomi (Fig. 94):

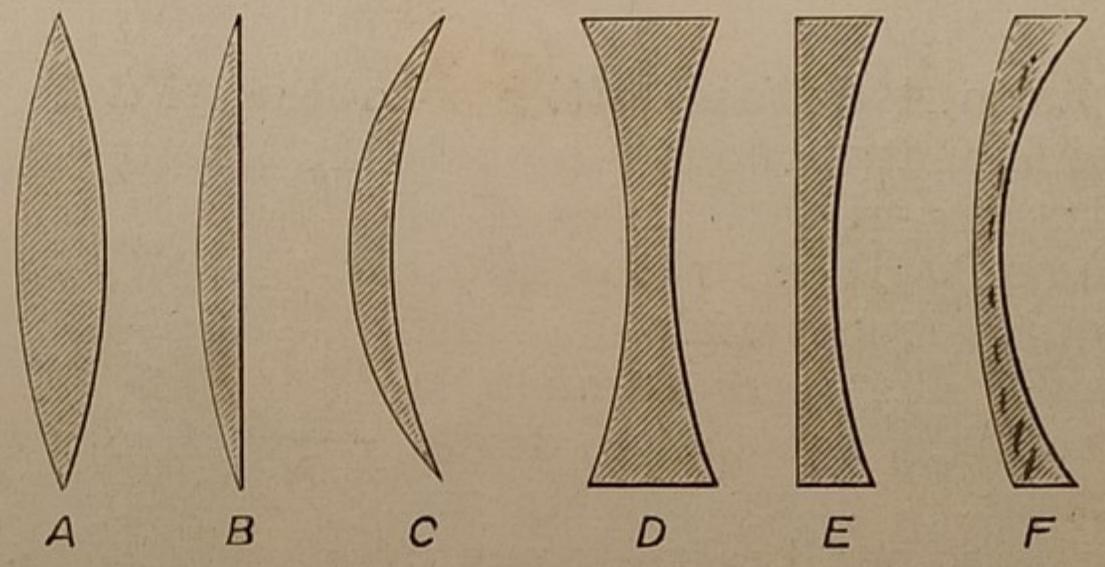


Fig. 94.

lenti convergenti	A	**biconvessa**
	B	**piano-convessa**
	C	**menisco convergente**
lenti divergenti	D	**biconcava**
	E	**piano-concava**
	F	**menisco divergente.**

Carattere comune alle lenti convergenti è di essere più grosse al centro e più sottili alla periferia; per le divergenti è l'opposto.

47. **Lenti convergenti.** — Studiamo la lente **biconvessa;** i risultati trovati s'intendono estesi alle altre due.

Siano C_1 e C_2 (Fig. 95) i centri delle due superfici sferiche che limitano la lente; la retta che li congiunge si chiama **asse ottico.**

Sia A un punto dell'asse ottico, ed AI uno dei raggi partenti da esso; in I passando da un mezzo meno ad uno più rifrangente, si avvicina alla normale IC_2, che è la congiungente I col centro C_2 della prima sfera. Il raggio prosegue indeviato sino al punto I_1; dove passando da un mezzo più ad uno meno rifrangente, si allontana dalla normale I_1C_1; esso emerge infine nella direzione I_1R. Il raggio ha così subìto due deviazioni: una dentro ed una fuori della lente. Nello studio elementare che noi facciamo, vogliamo trascurare la deviazione dentro la lente; cioè consideriamo la lente *sottilissima,* in modo che I ed I_1 siano sensibilmente lo stesso punto.

Consideriamo allora tutti i raggi partenti da un punto A (Fig. 96); essi, uscendo dalla lente, non s'incontrano tutti nello stesso punto; ma s'incontrano due a due in punti diversi, involgendo una superficie, che si chiama anche ora *caustica di rifrazione* o *diacaustica*.

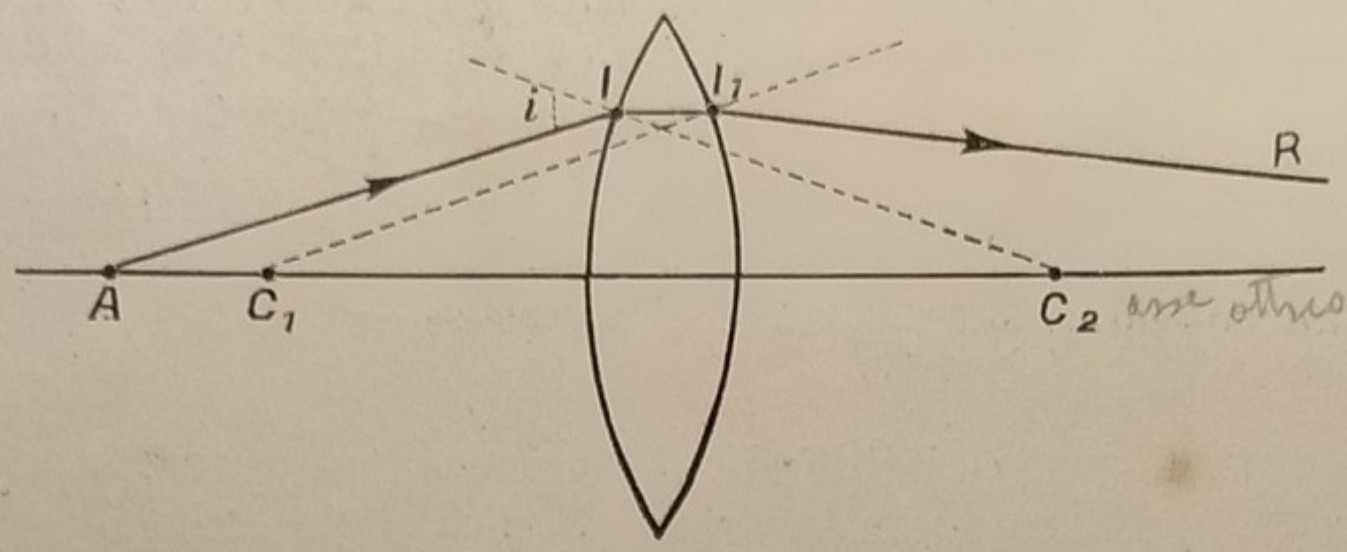


Fig. 95.

Se però *la lente è di piccola apertura*, cioè l'angolo $M C_2 N$ (Fig. 97) è piccolo, i raggi partenti da un punto A dell'asse ottico sono deviati dalla lente, in modo da riunirsi sensibilmente nello stesso punto A_1, situato anche esso sull'asse ottico; infatti, tra i raggi partenti da A vi è anche l'asse ottico AO, il quale incontrando la lente sulle due facce secondo la normale, non subisce deviazione, e dovrà passare anch'esso per A_1. Questo punto si chiama l'immagine di A; A ed A_1 si chiamano anche **punti coniugati.**

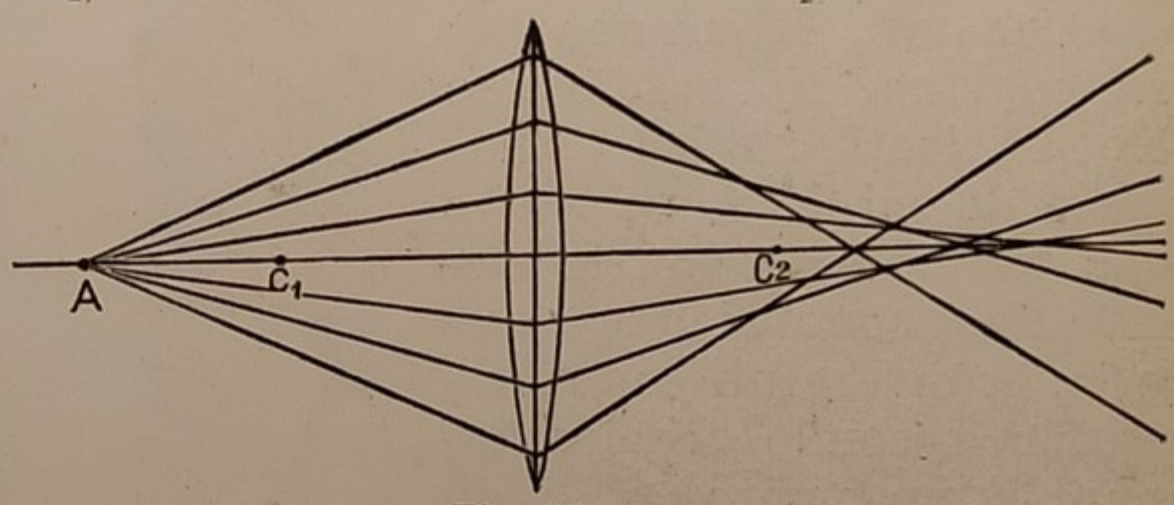


Fig. 96.

Ponendo: $AO = p$; $A_1O = q$; $C_1O = r$; $C_2O = r_1$ [1], ed essendo n l'indice di rifrazione relativo ai due mezzi in cui si propagano i raggi luminosi, si dimostra che fra tali quantità esiste la relazione:

$$1) \qquad \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = (n-1)\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r_1}\right).$$

Tale formula può servire a determinare q per un dato valore di p; cioè dato un punto luminoso sull'asse ottico, se ne determina la posizione dell'immagine.

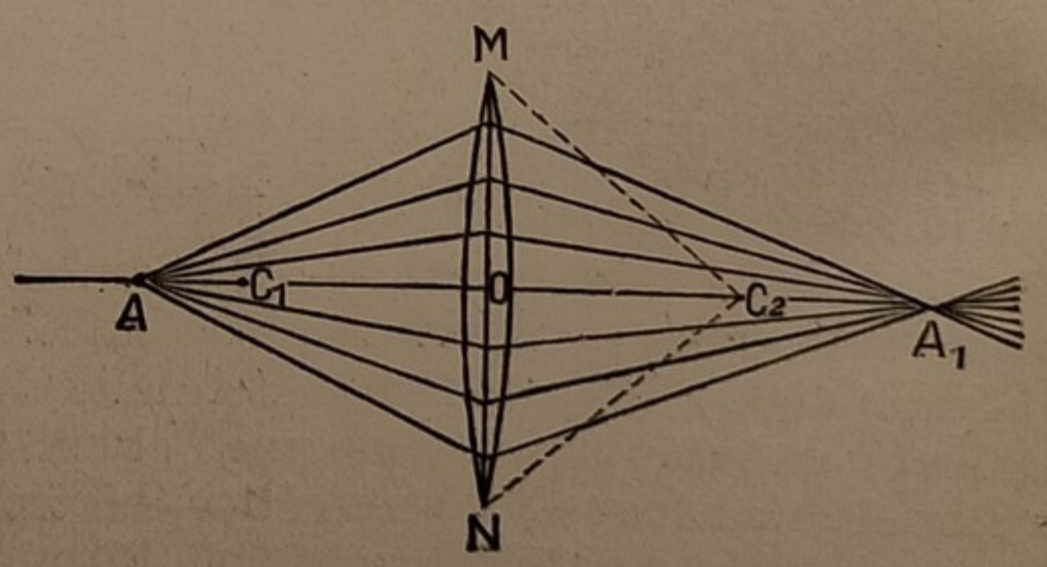


Fig. 97.

48. **Fuoco.** — La 1) vale per qualunque valore di p; quindi vale anche per $p = \infty$, cioè se i raggi arrivano alla lente parallelamente all'asse ottico. Sostituendo questo valore di p nella 1), e ricordando che $\frac{1}{\infty} = 0$, chiamando

(1) Avendo supposto la lente sottilissima, tali distanze si intendono misurate dal piano MN, a cui schematicamente si riduce la lente.

con f il valore particolare di q che corrisponde a questo caso, si avrà:

$$2) \qquad \frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r_1}\right).$$

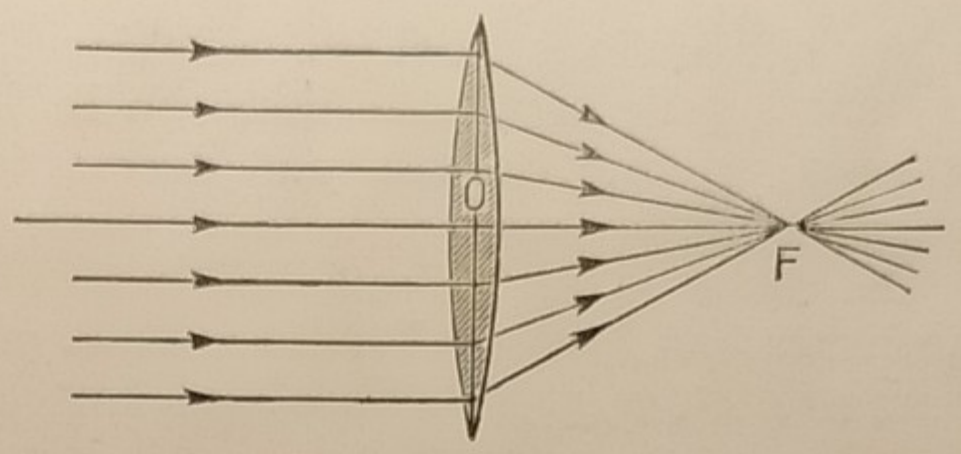


Fig. 98.

Essendo $n > 1$, risulta $f > 0$; cioè i raggi rifratti s'incontrano in un punto F, sull'asse ottico dall'altra parte della lente, che si chiama **fuoco principale,** (Fig. 98).

Si può eseguire una verifica sperimentale, dirigendo su una lente L' (Fig. 99) un fascio di raggi solari, che si ritengono praticamente paralleli; essi, uscendo dalla lente, si riuniscono in uno stesso punto F, come può scorgersi per l'illuminazione del pulviscolo. Mettendo in F uno schermo, vi si scorgerà un punto luminosissimo, realmente esistente; cioè il fuoco principale nella lente convergente è *reale*.

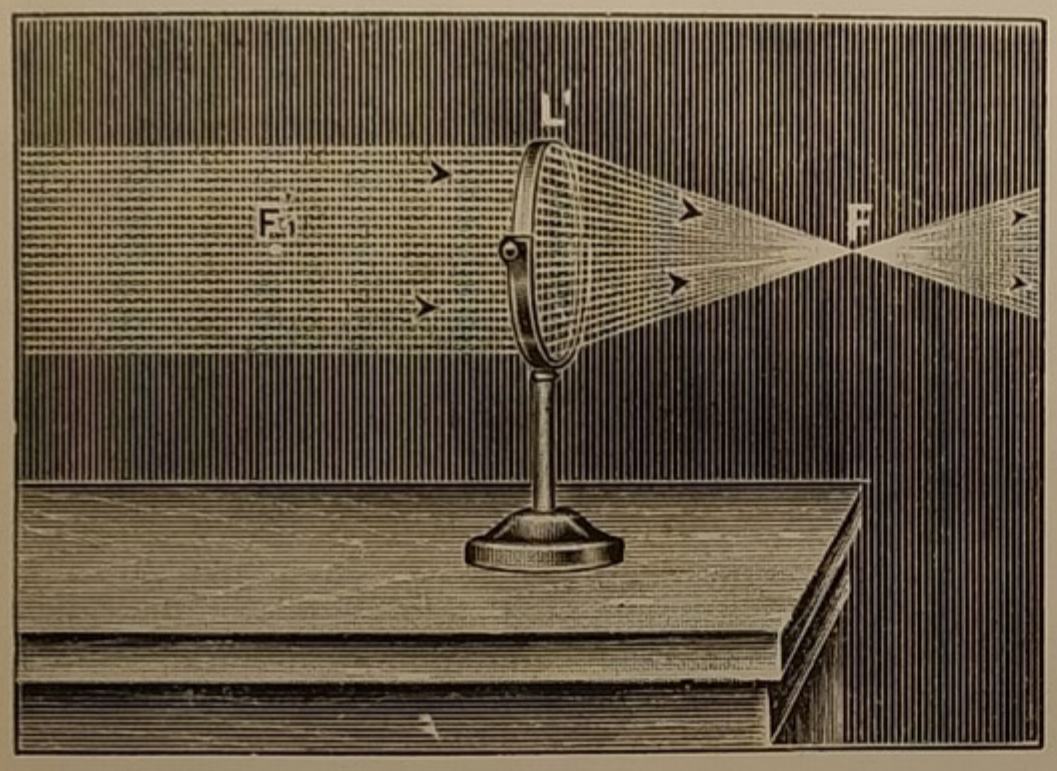


Fig. 99.

Vi è un altro fuoco principale F_1, definito analogamente, come il punto d'incontro dei raggi rifratti, che provengono da un fascio di raggi paralleli all'asse ottico, ma dall'altra parte della lente.

Se i raggi paralleli provengono dal Sole, nel fuoco s'incontrano oltre che i raggi luminosi anche quelli calorifici, e vi è concentrazione di calore; ponendo in quel punto un fuscellino di legno, esso s'infiamma. La Fig. 100 mostra come si può tagliare un filo in una bottiglia, tappata e sigillata, senza togliere il tappo. Basta concentrare sul filo i raggi del Sole con una lente convergente. L'esperimento riesce meglio se il filo è nero, e naturalmente occorre che il Sole sia vivo, e il vetro della bottiglia non troppo scuro.

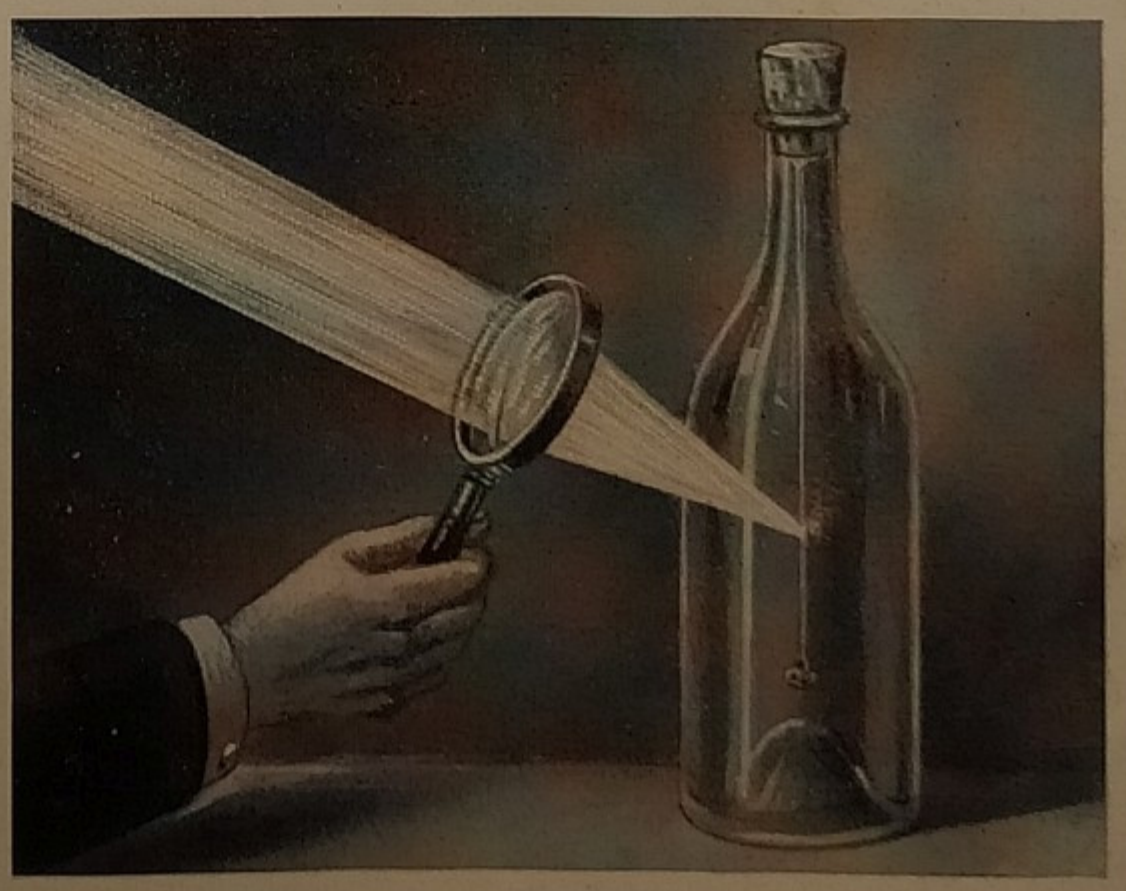


Fig. 100.

I due fuochi principali sono equidistanti dalla lente, qualunque sia la forma di questa; anche cioè nella lente pianoconvessa e nel menisco. Essi non sono, come nello specchio concavo, a metà del raggio, come si ricava anche dalla 2); infatti la loro posizione

oltre che dalla curvatura delle facce della lente, dipende dal valore di n. I centri delle sfere che limitano la lente, possono essere a diversa distanza, ed uno di essi può essere infinitamente lontano, se una delle facce è piana; mentre i fuochi sono sempre equidistanti dalla lente.

La distanza del fuoco dalla lente si chiama **la distanza focale,** e l'abbiamo indicata con f; essa è l'elemento più importante della lente e serve a determinarla. Cioè, per definire una lente, basta darne la distanza focale.

49. **Punti coniugati.** — Sostituendo nella 1) al 2° membro il valore equivalente della 2), si ottiene:

3) $$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f},$$

che si chiama **la formula dei punti coniugati,** la quale anche ora dice che: *la somma delle inverse delle distanze del punto luminoso e della sua immagine dalla lente, è uguale all'inversa della distanza focale.* Essa serve, come per gli specchi concavi, a trovare la posizione dell'immagine, allorchè sia assegnata la posizione del punto luminoso. Per questo, basta sostituire a p ed f i valori numerici dati, e risolvere rispetto a q l'equazione di 1° grado che se ne ricava. Il valore che si trova per q riportato sull'asse ottico, dall'altra parte della lente se è positivo, e dalla stessa parte se è negativo, determina la posizione dell'immagine.

Esempio. — *Dove si trova l'immagine di un punto posto a m. 0,45 da una lente convergente, la cui distanza focale è di m. 0,30?*

È in questo caso: $f = \text{cm. } 30$; $p = \text{cm. } 45$; quindi per la 3):

$\frac{1}{45} + \frac{1}{q} = \frac{1}{30}$; cioè: $\frac{1}{q} = \frac{1}{30} - \frac{1}{45} = \frac{1}{90}$, quindi: $\boldsymbol{q = \text{cm. } 90.}$

L'immagine è a 90 cm. dalla lente, dall'altra parte.

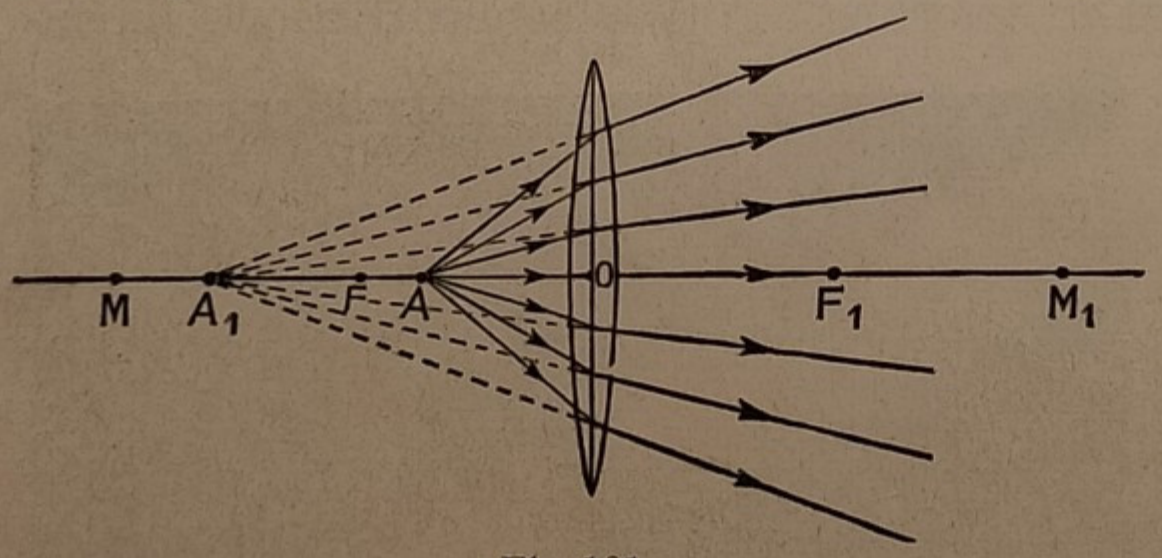


Fig. 101.

Facendo variare la posizione del punto luminoso, dall'infinito alla lente, si trovano con la 3) le posizioni corrispondenti dell'immagine. I risultati sono analoghi a quelli trovati per gli specchi concavi (§ 23), quando invece del centro di curvatura si considerino due punti M ed M_1 posti al *doppio della distanza focale* (Fig. 101); cioè tali che:

$$MO = M_1O = 2FO\ ;$$

si hanno i seguenti casi:

1. Se il punto luminoso è all'infinito, la sua immagine è sul fuoco. Si deduce dalla definizione del fuoco.

2. Se il punto luminoso è tra l'infinito ed il doppio della distanza focale, l'immagine è, dall'altra parte, *tra il fuoco ed il doppio della distanza focale.*

3. Se il punto luminoso è nel doppio della distanza focale (da una parte della lente), *l'immagine è anch'essa al doppio della distanza focale* (dall'altra parte).

4. Se il punto luminoso è tra il doppio della distanza focale ed il fuoco, l'immagine è tra il doppio della distanza focale e l'infinito (caso inverso del 2°).

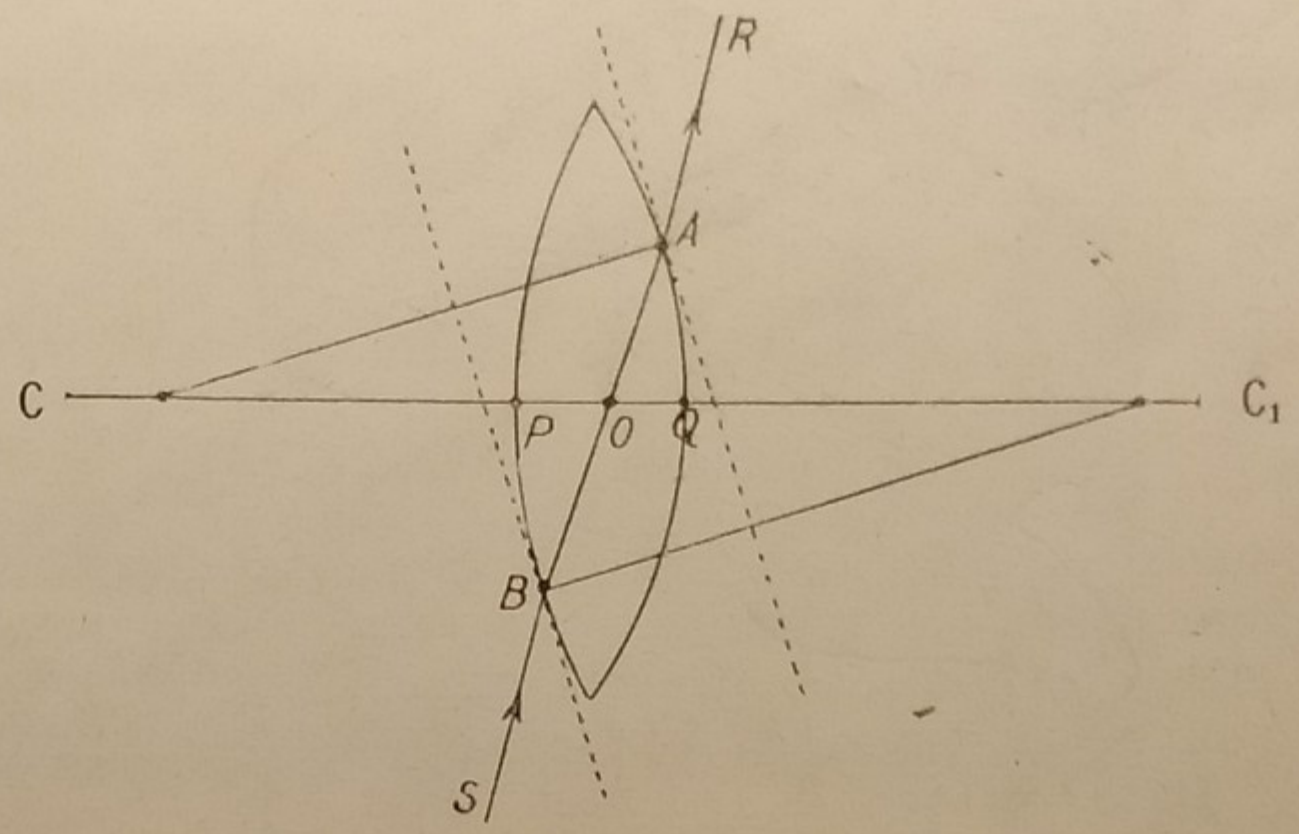


Fig. 102.

In tutti questi casi l'immagine è reale, perchè formata dall'incontro effettivo dei raggi rifratti.

5. Se il punto luminoso è nel fuoco, la sua immagine è all'infinito; (cioè se i raggi partono dal fuoco, escono dalla lente paralleli all'asse ottico; caso inverso del 1°).

6. Se il punto luminoso è tra il fuoco e la lente, l'immagine è virtuale, dalla stessa parte del punto luminoso. Cioè, in questo caso i raggi rifratti escono divergenti, e non s'incontrano che i loro prolungamenti, (Fig. 101).

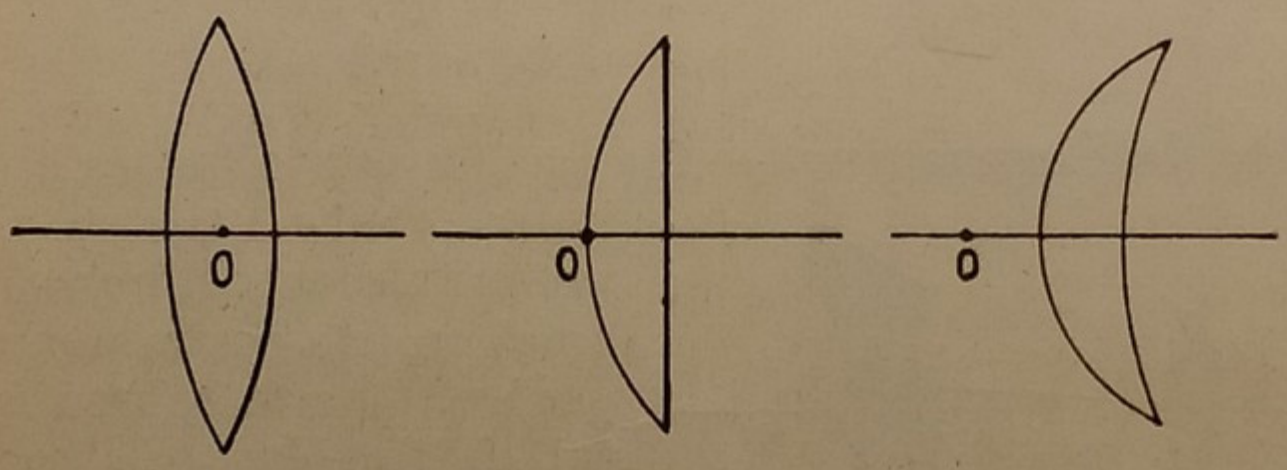


Fig. 103.

Notiamo anche ora che ad una variazione con continuità del punto luminoso dall'infinito alla lente, corrisponde una variazione con continuità della sua immagine: dal fuoco a $+\infty$, da $+\infty$ a $-\infty$ senza salto, e da $-\infty$ alla lente.

50. **Centro ottico - Assi secondari - Piani focali.** — Siano C e C_1 i centri di curvatura delle due facce sferiche di una lente, (Fig. 102.) Condotta CA a piacere, tracciamo C_1B parallela a CA; i piani tangenti in A e B, perpendicolari alle parallele CA–C_1B, sono tra loro paralleli. Un raggio incidente SB, che attraversando la lente passi per A, è come se attraversasse una lastra limitata dai piani tangenti in A e B; quindi (§ 38) esce secondo AR parallela ad SB. Supposta la lente sottilissima, i raggi SB ed AR appartengono alla stessa retta, che incontra l'asse ottico nel punto O. Questo punto chiamasi il **centro ottico**; e gode perciò della proprietà che: *qualunque raggio passante per esso, non subisce deviazione.*

Dai triangoli simili COA e C_1OB si ha che:

$OA : OB = CA : C_1B$; cioè, il centro ottico divide il segmento AB in parti proporzionali ai due raggi delle sfere che limitano la lente. Quindi il centro ottico coincide col punto medio del segmento PQ, solo nel caso che

la lente sia biconvessa, con le due superfici di egual curvatura; se no non coincide col centro, e può essere anche fuori della lente, come nel caso del menisco. La Fig. 103 mostra la posizione del centro ottico O nei casi principali.

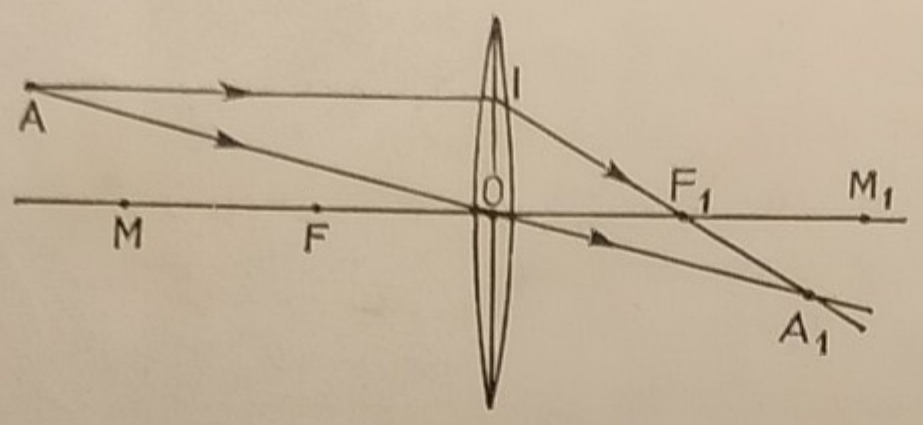


Fig. 104.

Ogni retta passante per il centro ottico si chiama **asse secondario.** Su ciascuno di questi esistono due **fuochi secondari**; definiti come luogo d'incontro dei raggi rifratti, provenienti da un fascio di raggi paralleli all'asse secondario, da una parte e dall'altra della lente. Di fuochi secondari ve n'è una doppia infinità; il loro luogo è sensibilmente formato da due piani, perpendicolari all'asse ottico, passanti per i fuochi principali; si chiamano i **piani focali.**

Dato un punto luminoso fuori dell'asse ottico, si conduca l'asse secondario passante per esso; se ne troverà l'immagine applicando ancora la formula 3) dei punti coniugati, e contando le distanze p, q, f su tale asse secondario.

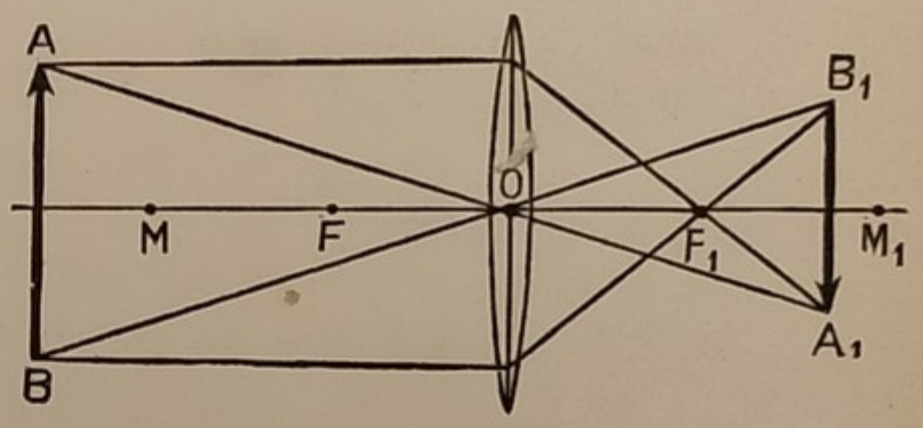


Fig. 105.

51. **Costruzione grafica dell'immagine.** — Ma per un punto fuori dell'asse ottico, si trova preferibilmente l'immagine con una costruzione grafica. Questa è basata sul fatto che se, per definizione, l'immagine è il punto d'incontro di *tutti* i raggi rifratti, per determinarla bastano *due* soli raggi; e precisamente ne sceglieremo due di cui è nota la direzione in cui si rifrangono, senza bisogno di applicare le leggi della rifrazione.

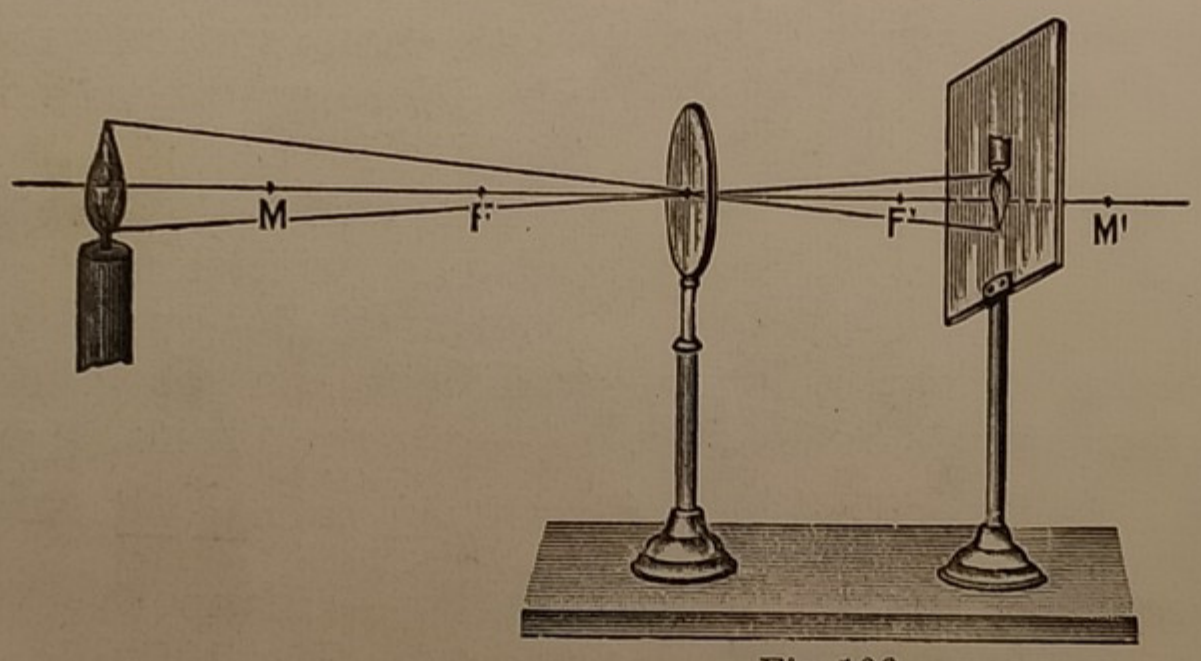


Fig. 106.

Ecco la costruzione che si applica in ogni caso. In tutte le figure seguenti supporremo la lente ridotta schematicamente ad un piano perpendicolare all'asse ottico e contenente il centro ottico, (Nota del § 47).

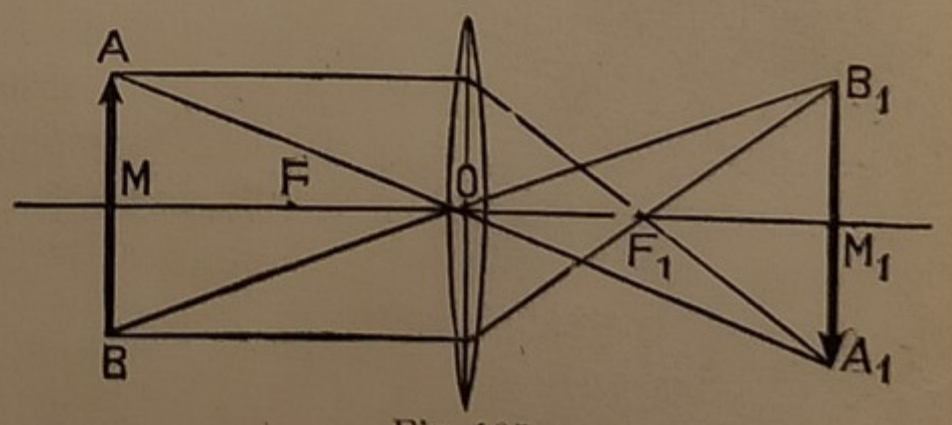


Fig. 107.

Sia A il punto luminoso dato (Fig. 104); si conduce da esso il raggio AI parallelo all'asse ottico, che si rifrange passando per il fuoco F_1; si conduce poi da A il raggio AO passante per il centro ottico, che

prosegue indeviato; i due raggi rifratti s'incontrano in un punto A_1, che è l'immagine cercata.

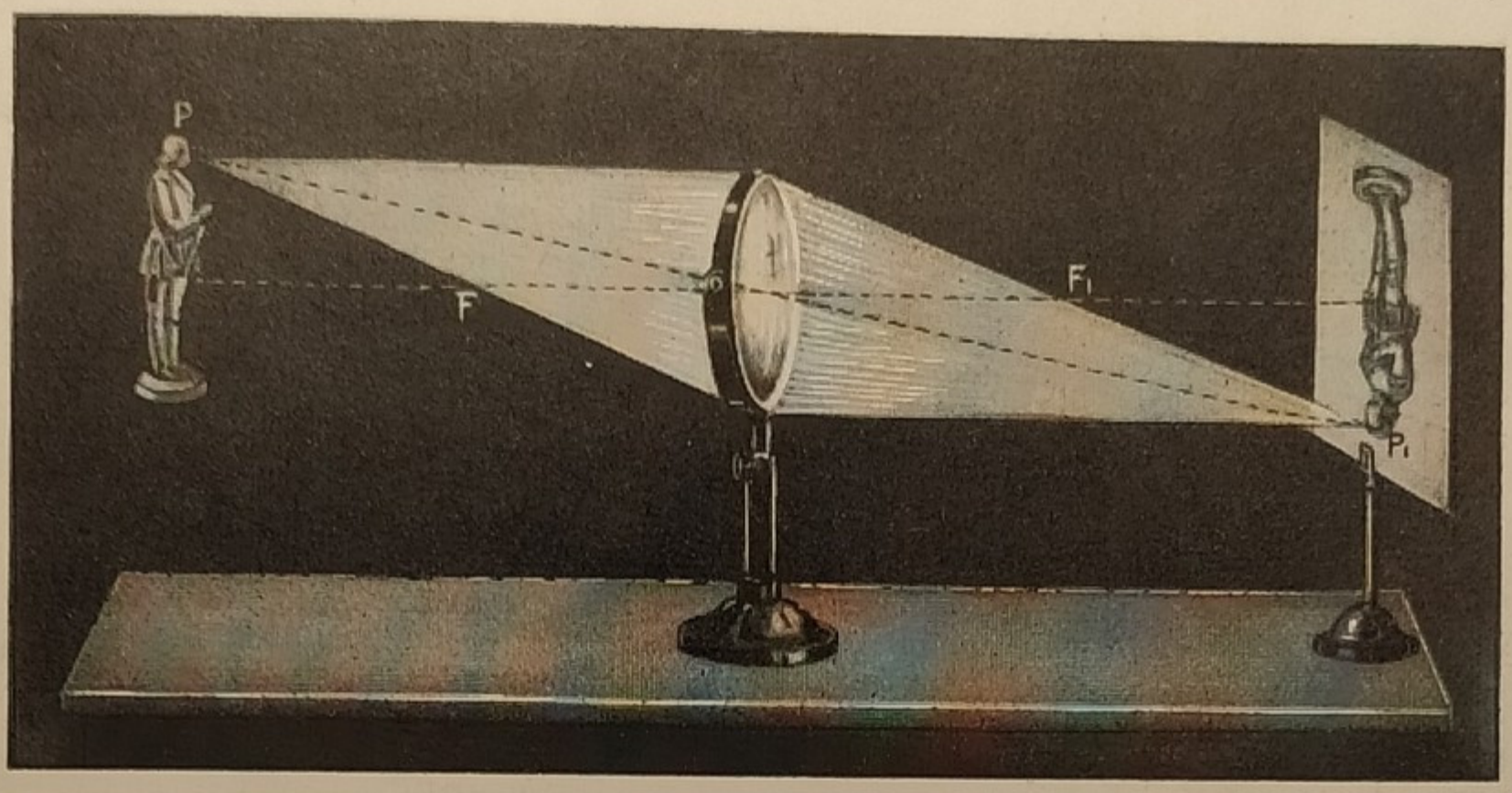


Fig. 108.

Applichiamo questa costruzione nei diversi casi, per trovare l'immagine di un oggetto; questo lo rappresenteremo al solito con una freccia AB, e troveremo solo le immagini A_1B_1 degli estremi. Ecco i casi principali; si tenga presente anche ora quanto si è detto nella Nota del § 25:

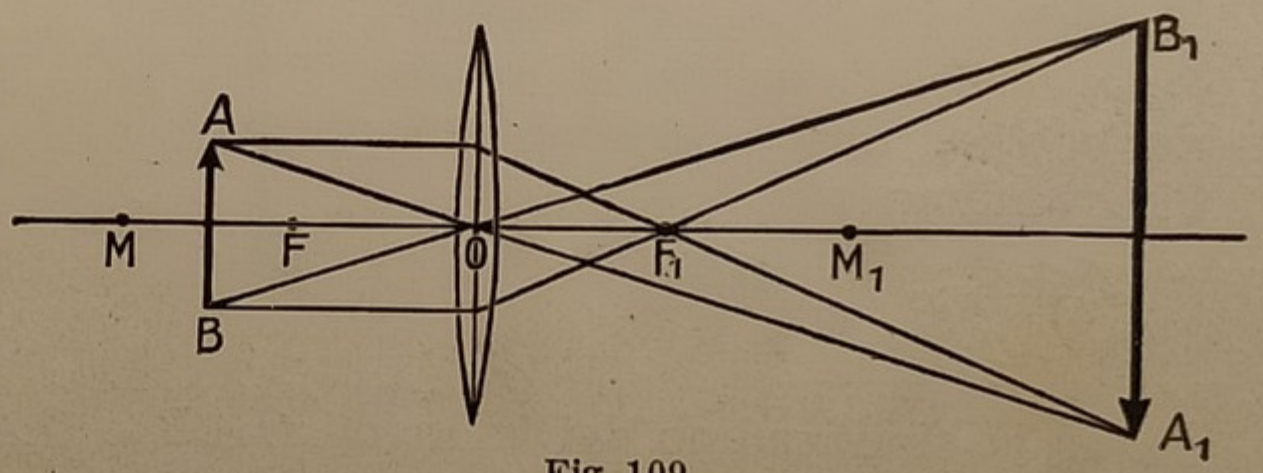


Fig. 109.

1. Se l'oggetto è tra l'infinito ed il doppio della distanza focale, l'immagine è tra il fuoco ed il doppio della distanza focale, dall'altra parte della lente; ed è reale, capovolta, impiccolita (Fig. 105); la verifica sperimentale è rappresentata nella Fig. 106.

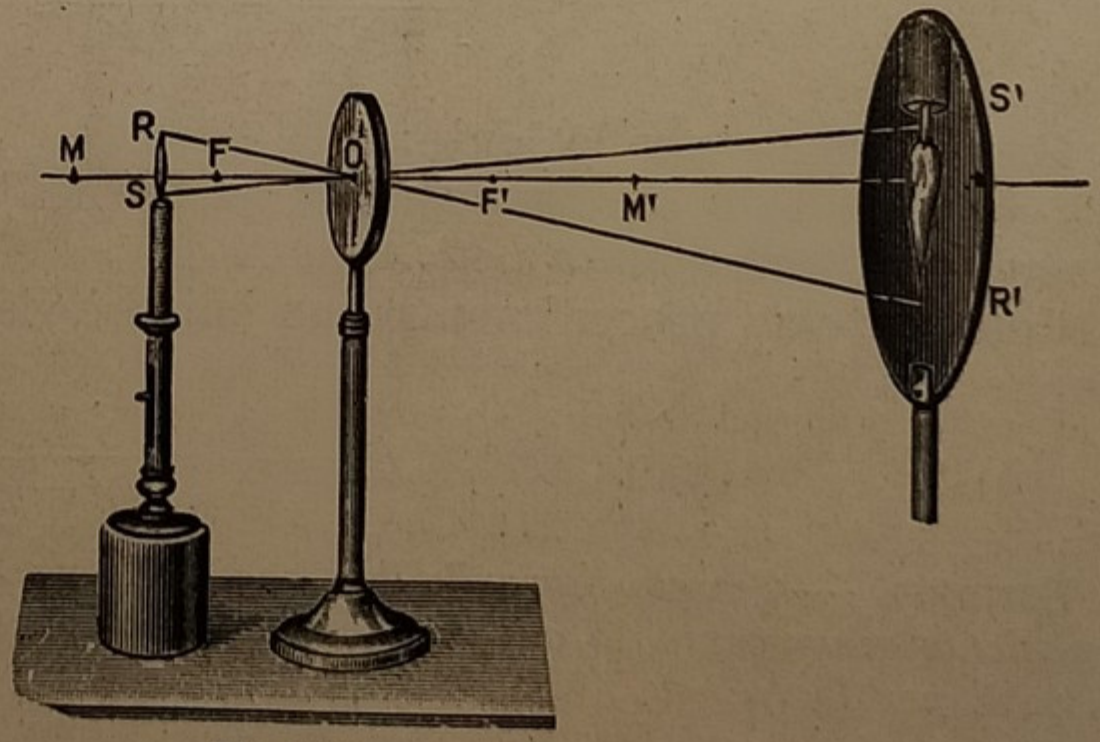


Fig. 110.

2. Se l'oggetto è al doppio della distanza focale, anche l'immagine è al doppio della distanza focale, dall'altra parte; ed è reale, capovolta, della stessa grandezza, (Fig. 107, la verifica sperimentale come in Fig. 108).

3. Se l'oggetto è tra il doppio della distanza focale ed il fuoco, l'immagine è tra il doppio della distanza focale e l'infinito; ed è reale, capovolta e ingrandita, (Fig. 109, e la verifica sperimentale come in Fig. 110).

4. Se l'oggetto è nel piano focale, l'immagine è all'infinito, infinitamente grande.

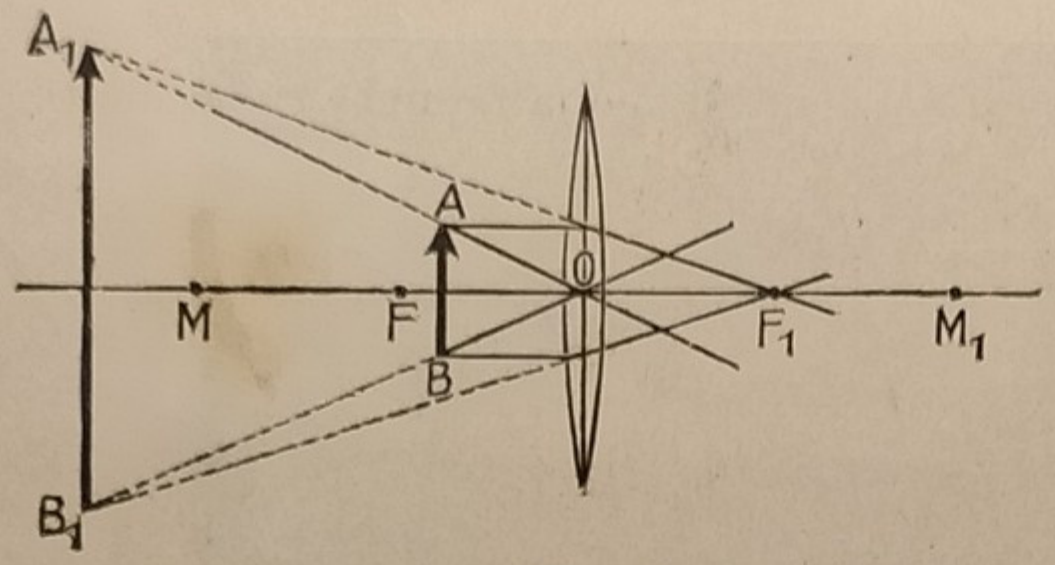


Fig. 111.

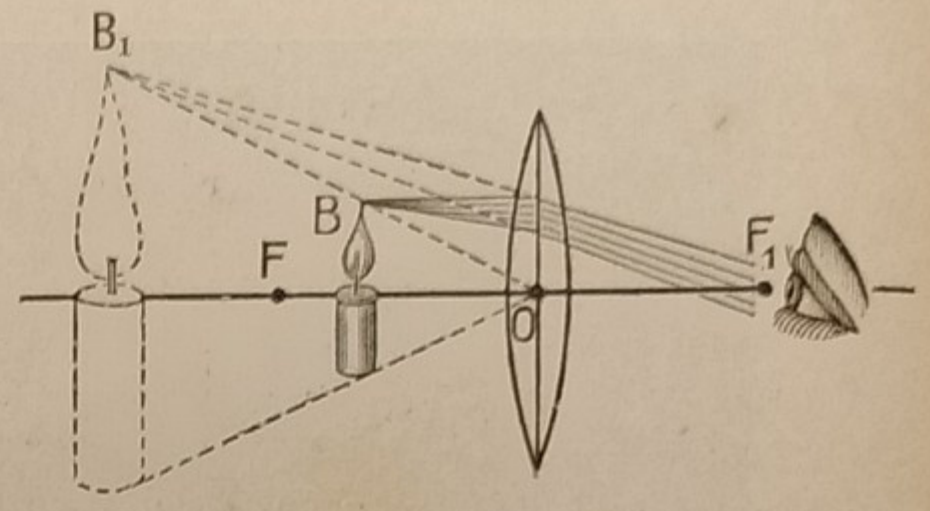


Fig. 112.

5. Se l'oggetto è tra il fuoco e la lente, l'immagine è dalla stessa parte, tra l'oggetto e l'infinito; ed *è virtuale, diritta, ingrandita,* (Fig. 111). Per la verifica sperimentale si noti, che essendo l'immagine virtuale, non può raccogliersi su uno schermo, ma è solo visibile con l'occhio, (Fig. 112).

52. **Ingrandimento.** — Si definisce anche ora, come per lo specchio concavo (§ 26): **ingrandimento** *è il rapporto tra la grandezza*[1] *dell'immagine e quella dell'oggetto.* Cioè, chiamando G l'ingrandimento:

$$4) \qquad G = \frac{A_1B_1}{AB}\,.$$

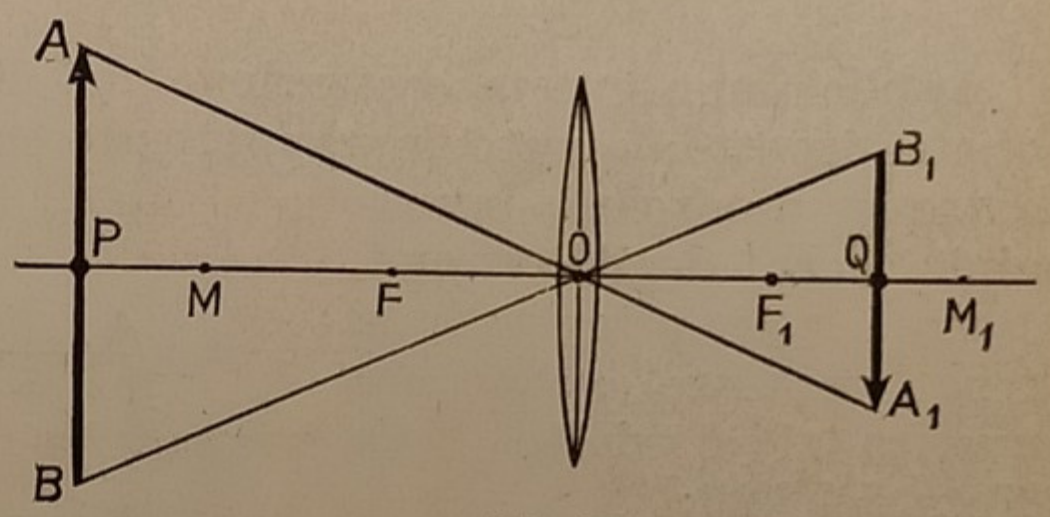


Fig. 113.

Per la similitudine dei triangoli OAB e OA_1B_1 (Fig. 113) è:

$$\frac{A_1B_1}{AB} = \frac{OQ}{OP} = \frac{q}{p}\,.$$

Quindi anche per la lente:

la grandezza dell'immagine e quella dell'oggetto stanno fra loro come le rispettive distanze dalla lente.

Con lo stesso procedimento con cui si è ricavata la 8) del § 26, si troverà anche ora che:

$$5) \qquad G = \frac{q}{p} = \frac{f}{p-f}\,.$$

Esempio. — *Quanto è grande l'immagine di un albero, alto m. 15, posto a m. 25 da una lente convergente, la cui distanza focale è cm. 25?*

Sarà per la 5):

$$\frac{x}{15} = \frac{0{,}25}{25-0{,}25} = \frac{0{,}25}{24{,}75}\,;$$ da cui:

$$x = \text{m.}\,\frac{15 \times 0{,}25}{24{,}75} = \textbf{cm. 15,15.}$$

---

(1) Vedi nota al § 26.

Problema. — *A cm. 75 da una lente convergente di cm. 50 di distanza focale, si pone un segmento di cm. 20 d'altezza, perpendicolare all'asse ottico; calcolare la posizione dell'immagine e la grandezza.*

Soluzione. — Per la posizione dell'immagine, adopereremo la formula 3) dei punti coniugati, in cui p = cm. 75 ed f = cm. 50; si otterrà:

$$\frac{1}{75} + \frac{1}{q} = \frac{1}{50}\,; \qquad \text{da cui:}$$

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{150}, \qquad \text{e:} \qquad \boldsymbol{q = \text{cm. } 150.}$$

Per la grandezza dell'immagine adopereremo la formula 5) dell'ingrandimento, con $p = 75$, $q = 150$. Chiamando G l'ingrandimento, sarà:

$$G = \frac{150}{75} = 2\,; \qquad \text{cioè la}$$

grandezza dell'immagine è doppia di quella dell'oggetto; essa quindi è alta: **cm. 40.**

53. **Lenti divergenti.** — Studiamo solo la lente **biconcava**; i risultati ottenuti valgono per le altre due.

I centri di curvatura C e C_1, l'asse ottico, il centro ottico O, l'asse secondario, si definiscono come per la lente biconvessa.

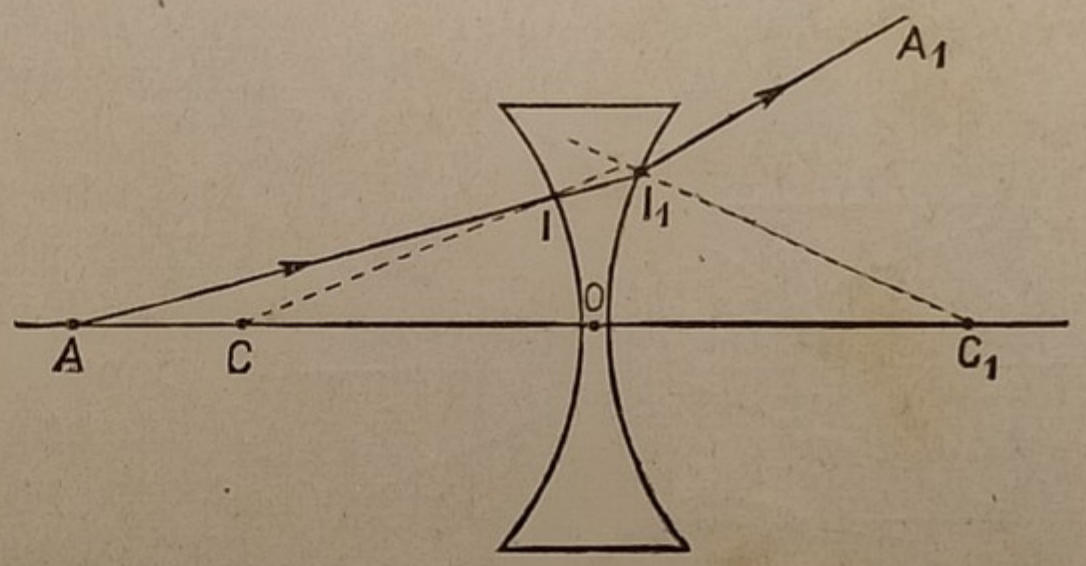


Fig. 114.

Sia A un punto luminoso dell'asse ottico; un raggio AI partente da A (Fig. 114), subisce due deviazioni; una volta entrando in I nella lente si avvicina alla normale CI, l'altra volta uscendo da I_1 dalla lente, si allontana dalla normale I_1C_1. Se la lente è sottilissima, si trascura la deviazione II_1.

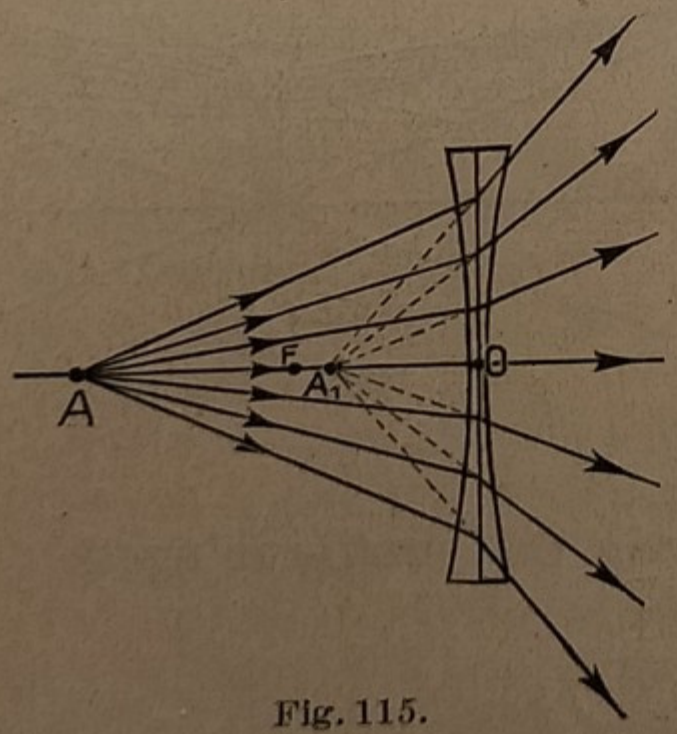


Fig. 115.

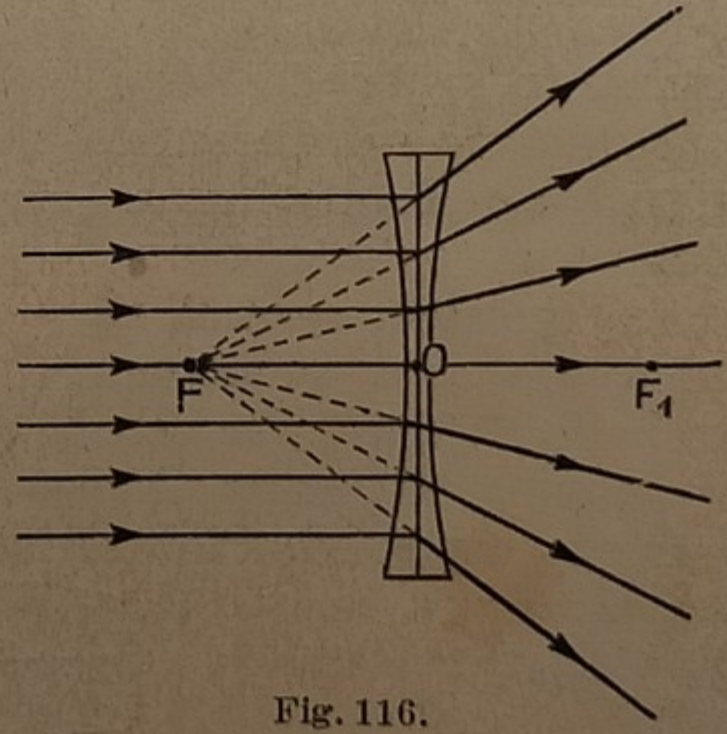


Fig. 116.

Tutti i raggi che partono da un punto luminoso A (Fig. 115), escono dalla lente formando un fascio di raggi divergenti, che non s'incontrano; ma se *la lente è di piccola apertura*, s'incontrano i loro prolungamenti in un punto

A_1, dalla stessa parte di A, che si chiama l'**immagine** o **punto coniugato** di A. Quest'immagine è quindi **virtuale**.

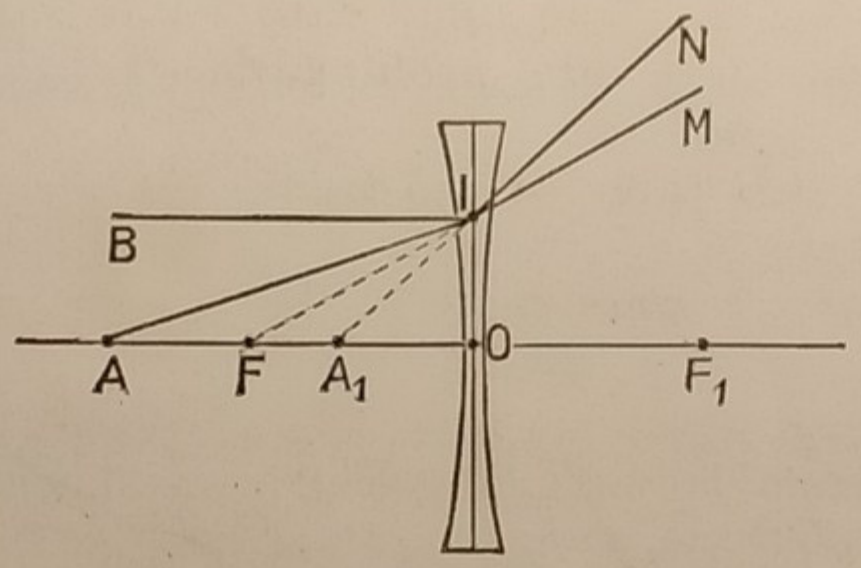


Fig. 117.

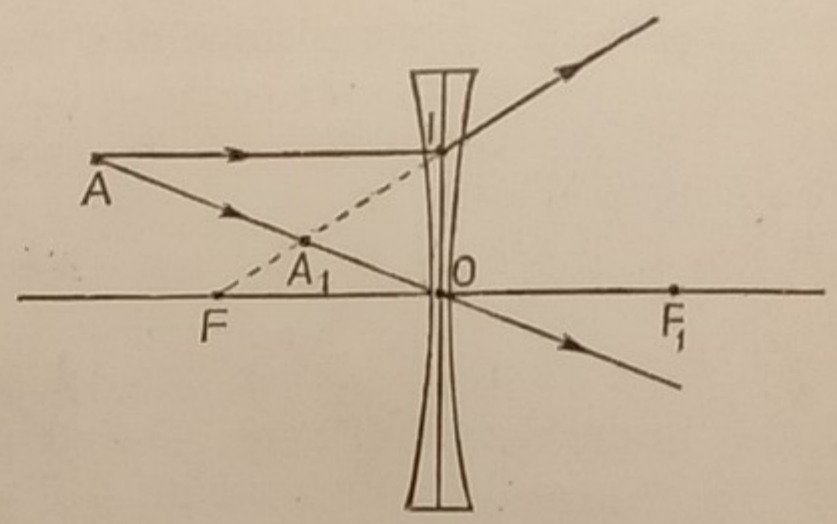


Fig. 118.

Se il punto A è all'infinito, cioè se i raggi arrivano paralleli all'asse ottico (Fig. 116), si rifrangono ancora in un fascio di raggi divergenti, i cui prolungamenti s'incontrano in un punto F, che si chiama **fuoco principale**, ed è virtuale.

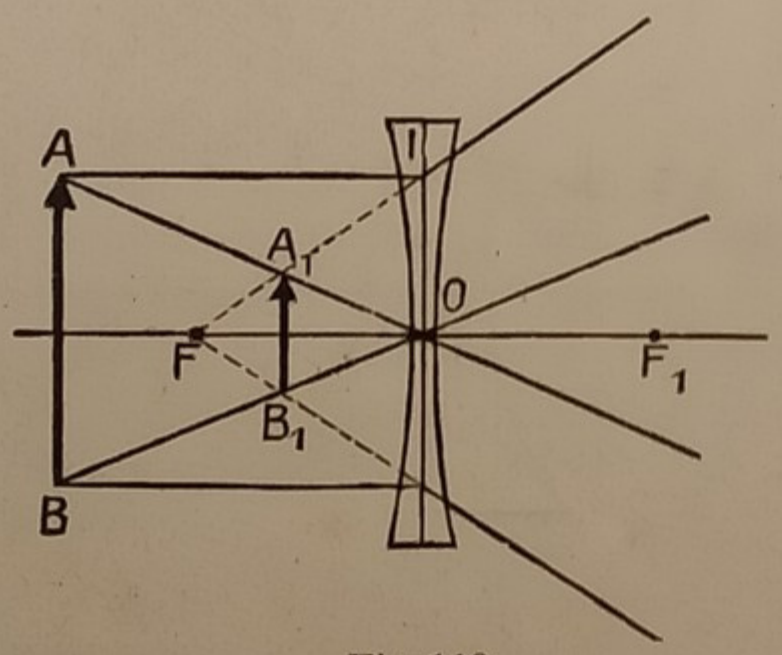


Fig. 119.

Vi è un secondo fuoco principale F_1 definito in modo analogo, allorchè i raggi paralleli provengono dall'altra parte della lente; F ed F_1 sono equidistanti dalla lente.

Consideriamo incidenti nello stesso punto I due raggi BI ed AI (Fig. 117), di cui il primo parallelo all'asse ottico; se questo esce divergente nella direzione IM, a maggior ragione sarà più divergente il raggio rifratto IN di AI che è già esso stesso divergente. Cioè il prolungamento di NI incontrerà l'asse ottico in un punto A_1, più vicino alla lente che F. Dunque: *Ovunque sia il punto luminoso, la sua immagine è sempre virtuale, tra il fuoco e la lente.*

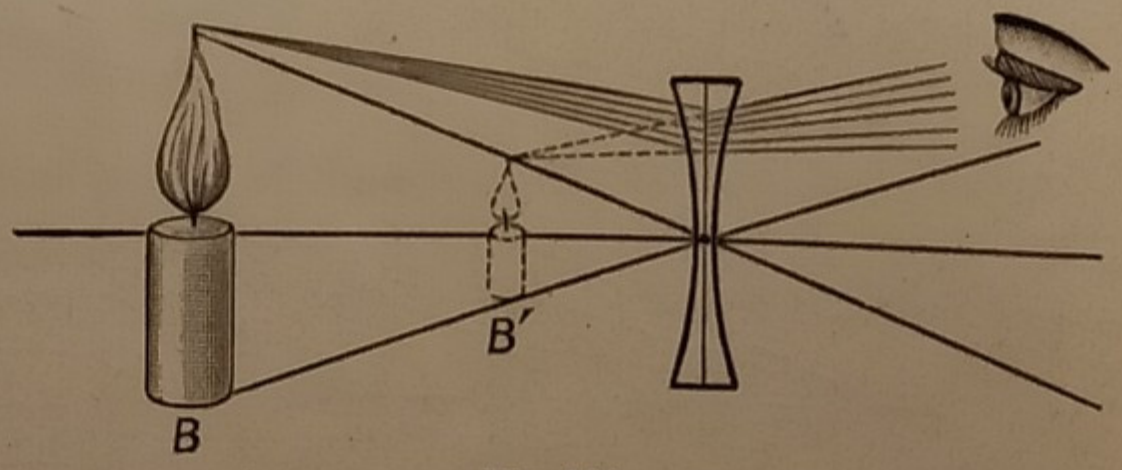


Fig. 120.

Chiamando p la distanza del punto luminoso dalla lente, q la distanza della sua immagine dalla lente e f la distanza focale, fra queste quantità si può ricavare una relazione analoga alla 3) del § 49; con l'osservazione che ora q ed f sono sempre negativi. Cioè si ha la **formula dei punti coniugati:**

$$6) \qquad \frac{1}{p} - \frac{1}{q} = -\frac{1}{f},$$

che permette al solito di trovare l'immagine, assegnata la posizione del punto luminoso.

Se il punto luminoso è fuori dell'asse ottico, ne troviamo senz'altro l'immagine con la seguente **costruzione grafica**: Sia A il punto (Fig. 118); si

considera da esso il raggio AI parallelo all'asse ottico, che si rifrange in modo che *il suo prolungamento* passi per il fuoco F; si considera poi il raggio AO che passa per il centro ottico e che prosegue indeviato; i due raggi rifratti non s'incontrano, ma s'incontrano i loro prolungamenti in un punto A_1 che è l'immagine cercata.

Se si vuole l'immagine di un oggetto AB (Fig. 119), si trova l'immagine A_1B_1 dei suoi estremi; si ha che:

Ovunque sia l'oggetto, la sua immagine è sempre virtuale, diritta, impiccolita, tra il fuoco e la lente.

La Fig. 120 ne mostra la verifica sperimentale.

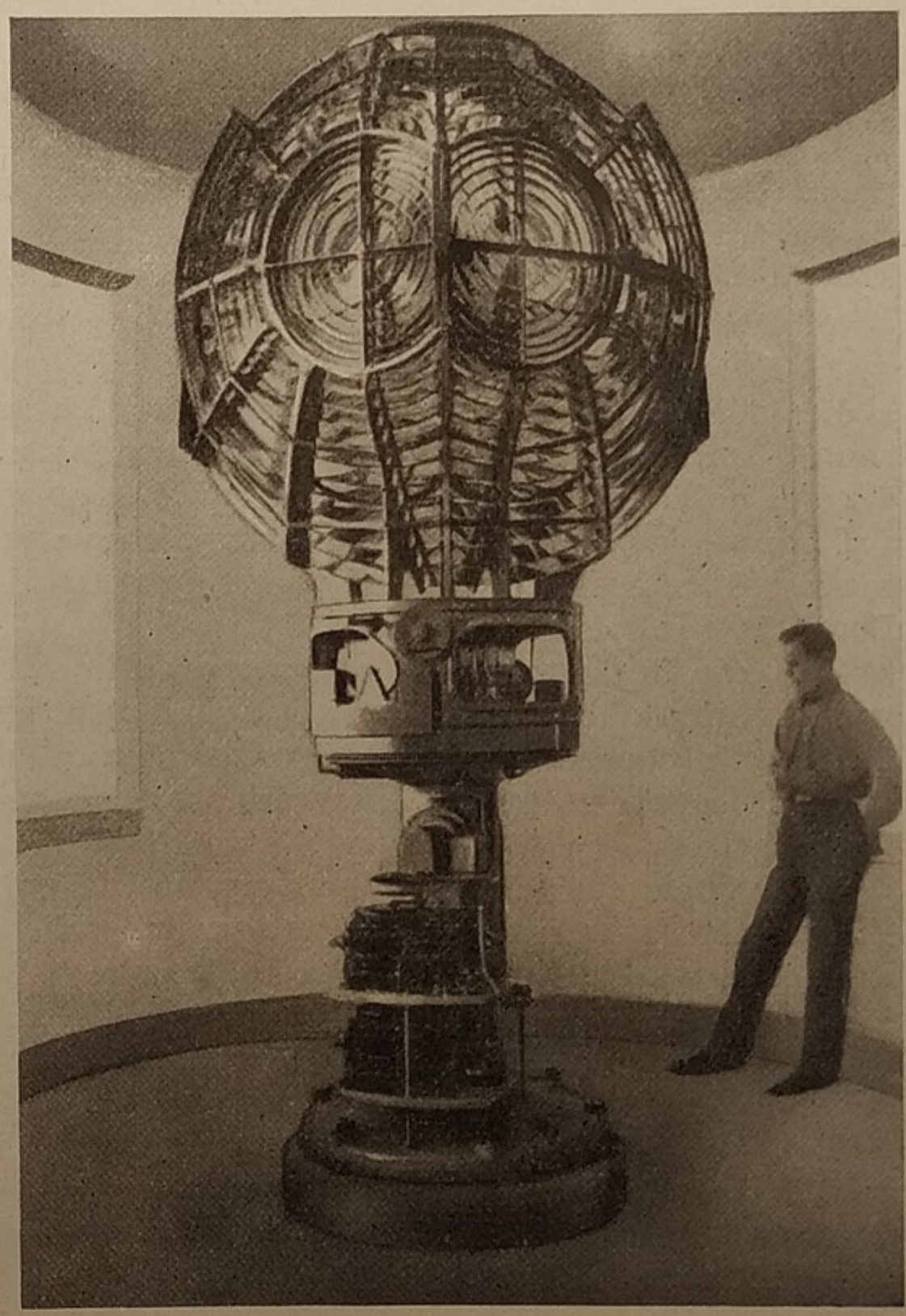


Fig. 122.

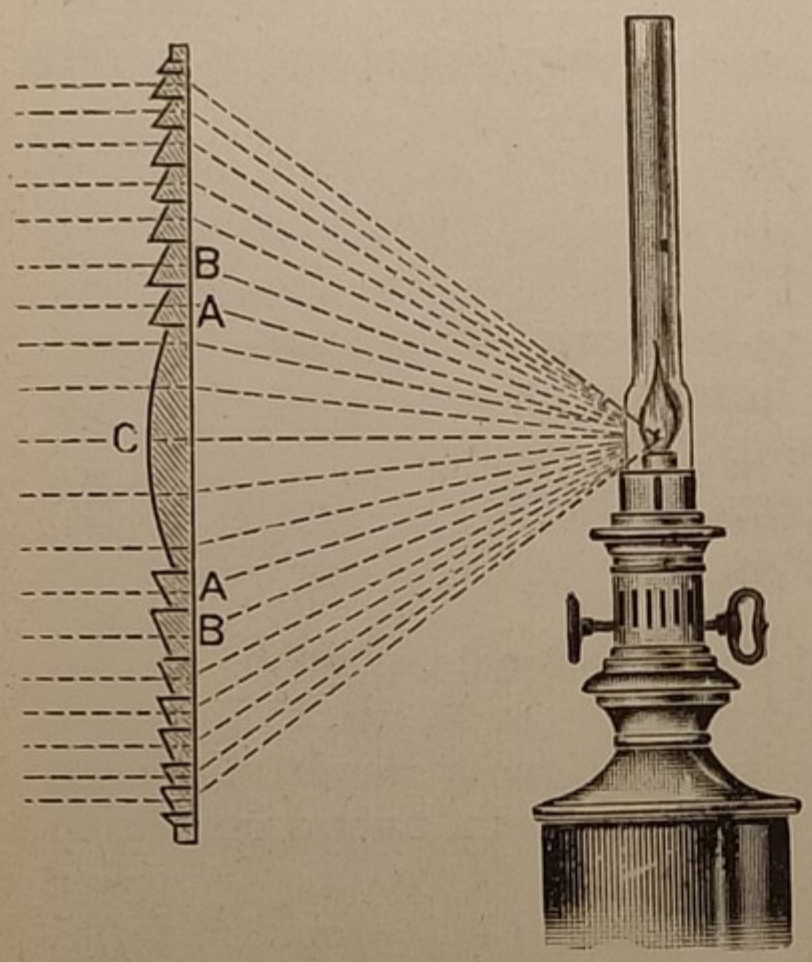


Fig. 121.

54. **Applicazioni delle lenti - Fari.** — Le lenti si applicano specialmente negli strumenti ottici, di cui parleremo in un capitolo a parte. Ora citiamo i **fari**, che servono ad inviare lontano sul mare un fascio di raggi luminosi, a scopo di segnalazione.

Per questo s'impiega una lente convergente nelle condizioni del N. 5 del § 49; cioè si pone una sorgente luminosa al fuoco della lente, in modo che da questa viene proiettato lontano un fascio di raggi paralleli. Ma ricordiamo che i risultati studiati valgono per lenti di piccola apertura; con una lente ordinaria quindi non si potrebbe utilizzare che una piccola parte dei raggi partenti dalla sorgente luminosa.

Per evitare tale inconveniente, si fa uso di una **lente a scaglioni** (Fig. 121); essa è formata da una lente centrale C piano-convessa, di piccola apertura, circondata da un sistema di anelli piano-convessi AB.. concentrici, le cui curvature sono scelte in modo, che i raggi partenti dal fuoco escano poi

parallelamente all'asse ottico di tutto il sistema. Essa è stata inventata da Fresnel nel secolo scorso.

Come sorgente luminosa si adopera una lampada a petrolio per i piccoli fari, o ad acetilene per quelli più importanti; talvolta meglio l'arco voltaico elettrico (§ 286). Tutto il sistema ottico è girevole attorno ad un asse verticale, per mezzo di un movimento d'orologeria, in modo da dirigere il fascio di luce successivamente in tutti i punti dell'orizzonte; da lontano così la luce si scorge a lampi successivi; la durata di ciascun lampo, e il tempo con cui si susseguono, varia da faro a faro, e serve a distinguerli uno dall'altro.

La Fig.122 mostra il sistema ottico di un faro moderno.

Una lente convergente del diametro di qualche centimetro può adoperarsi per accendere il fuoco; concentrando con essa i raggi solari su un pezzo di carta o su un fuscello di legno.

Problemi da risolvere.

1. Quale dev'essere la distanza focale di una lente convergente, perchè una persona di m.1,70 d'altezza, posta davanti alla lente, formi un'immagine di cm.15, a 12 cm. dalla lente; e a che distanza deve essere posta tale persona?

2. Si vuole ottenere, con una lente biconvessa di cm.12 di distanza focale, un'immagine 8 volte più grande dell'oggetto; a quale distanza dalla lente devono esser posti l'oggetto e lo schermo?

3. A cm.75 da una lente convergente di cm.10 di distanza focale, è posto un oggetto luminoso di 40 cm. di altezza. Dall'altra parte della lente, a 25 cm. di distanza, è posto uno specchio piano, perpendicolare all'asse ottico, il quale rinvia alla lente i raggi ricevuti da questa. Determinare posizione e grandezza della nuova immagine formatasi.

4. Si vuole che una lente convergente, la cui distanza focale è f = cm.15, formi l'immagine (reale) di un oggetto, su uno schermo posto alla distanza d = m.2,50 da esso. A qual distanza dall'oggetto, tra questo e lo schermo, dovrà collocarsi la lente?

5. Una lente divergente di 10 cm. di distanza focale, riceve un fascio cilindrico di raggi, di 3 cm. di diametro. A quale distanza dalla lente si deve collocare uno schermo, per osservarvi un cerchio di luce di 30 cm. di diametro?

6. Una lente convergente ed una divergente sono centrate sul medesimo asse ottico, ed hanno un fuoco in comune; la loro distanza focale è f = cm.12; nel piano focale comune è posto un oggetto di altezza d = cm.5. Determinare gli elementi delle immagini formate dal sistema.

Acromatismo.

55. **Acromatismo nei prismi.** — Ricordiamo (§ 43) che se un raggio di luce bianca attraversa un prisma, è contemporaneamente deviato e disperso nei suoi colori (Fig.123). Abbiamo visto che la causa del fenomeno è dovuta alla diversa deviazione dei varî raggi colorati: la deviazione δ_v del raggio violetto è la massima; quella δ_r del raggio rosso è la minima. L'angolo Δ formato dal raggio rosso col violetto, eguale (sensibilmente) alla differenza $\delta_v - \delta_r$, definisce *la dispersione* del prisma.

Fu proposto il problema di far deviare, con prismi, la luce bianca, senza scomporla. Newton negò una soluzione di questo problema, dicendo che

dispersione della luce è conseguenza della diversa deviazione dei raggi colorati, e cioè deviazione e dispersione sono causa ed effetto; non si può quindi annullare l'effetto senza annullare insieme la causa.

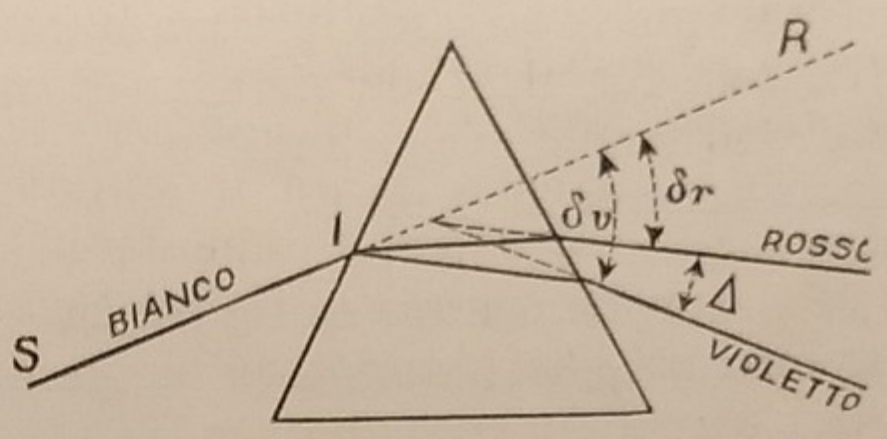


Fig. 123

Si possono annullare insieme dispersione e deviazione, ponendo un secondo prisma eguale ed *opposto* al primo, come mostra la Fig. 124; essi insieme costituiscono una lastra (§ 38), la quale nè devia nè disperde la luce. Dalla Fig. 124 sembrerebbe che la luce uscente dal secondo prisma fosse ancora scomposta, poichè da un raggio incidente SI è generato un fascio di raggi paralleli $I_2R_2 - I_3R_3$, variamente colorati. Ma si pensi che non possiamo limitarci a considerare la rifrazione di *un solo* raggio SI; sul prisma dovremo inviare un fascio di raggi paralleli. Su una direzione qualsiasi I_2R_2 si sovrappongono allora i varî raggi diversamente colorati provenienti da diversi raggi SI, $S'I'$.... del fascio incidente, e vi si ricompone nuovamente la luce bianca. Ciò anche si comprende per il fatto che i raggi rossi e i violetti essendo paralleli, formano un angolo nullo; cioè la dispersione è nulla.

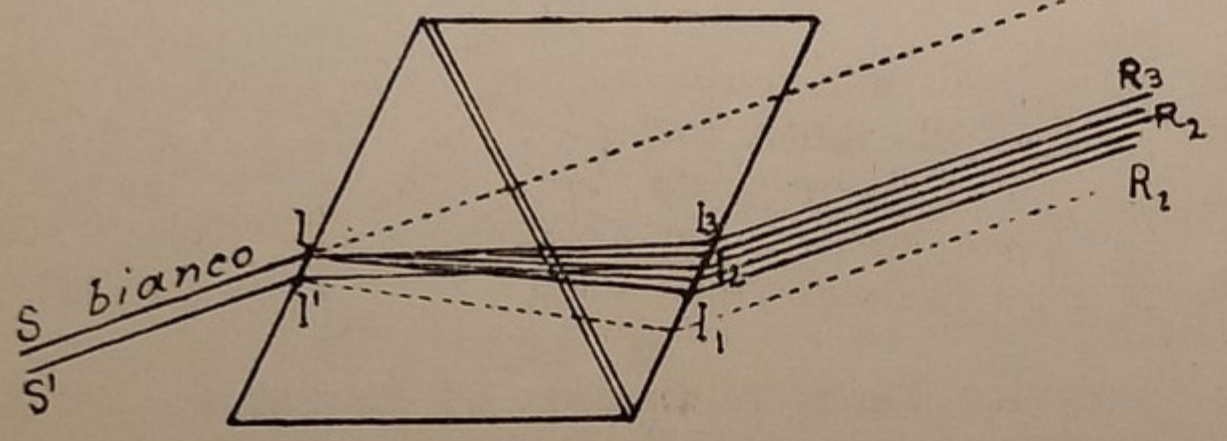


Fig. 124.

Ma Newton s'ingannava; Dolland (nel 1775) riuscì a trovare una soluzione del problema, basata sul fatto che, per le diverse sostanze trasparenti, *la dispersione non è proporzionale alla deviazione*; cioè un prisma può deviare i raggi più di un altro, pur disperdendoli meno.

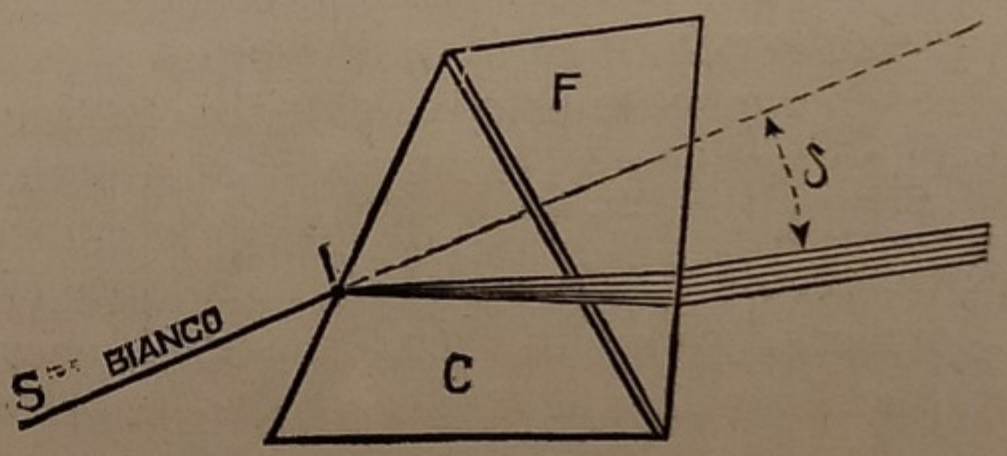


Fig. 125.

Costruiamo allora due prismi, uno C di vetro **crown** [1] e l'altro F di vetro **flint** [2] (Fig. 125) e facciamoli con gli angoli rifrangenti tali che abbiano eguale dispersione. Per ottenere questo, data la piccola dispersione del crown, bisogna costruire questo prisma con angolo rifrangente notevolmente maggiore del prisma di flint; in tal modo il *prisma di crown avrà una deviazione maggiore, circa doppia, di quella del prisma di flint.*

Ponendo questi due prismi opposti, come è indicato in Fig. 125, la dispersione e la deviazione risultante saranno la differenza di quelle di ciascun

---

(1) Il *crown* è un vetro leggero, a base di silicato di potassio, che ha poca dispersione.

(2) Il vetro *flint* è il comune cristallo, vetro pesante, a base di silicato di piombo, che disperde molto la luce.

prisma; quindi la dispersione si annulla, mentre la deviazione, pur riducendosi circa alla metà, non si annulla. Si ottiene così l'effetto richiesto. Un tal sistema si chiama **prisma acromatico.**

Si può costruire un sistema di prismi con l'effetto opposto, di annullare la deviazione, senza annullare la dispersione; un tal sistema forma il cosidetto **prisma di Amici.**

56. **Acromatismo nelle lenti.** — Il problema dell'acromatismo ha una importanza assai maggiore per le lenti.

Sia una lente convergente O, (Fig. 126). I raggi di luce bianca partenti da un punto luminoso A, deviano e si scompongono passando per la lente O; tutti i raggi rossi si riuniranno in un punto R,

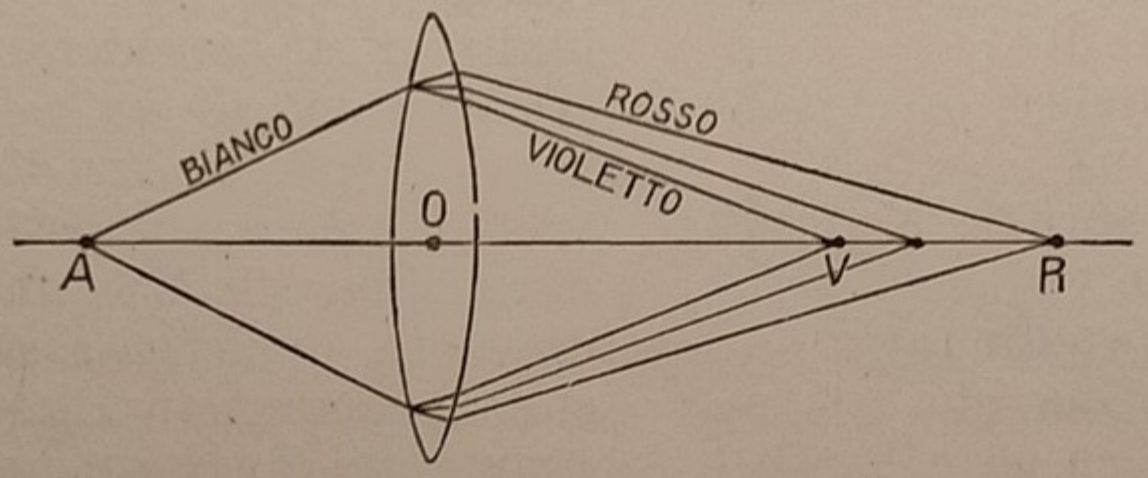


Fig. 126.

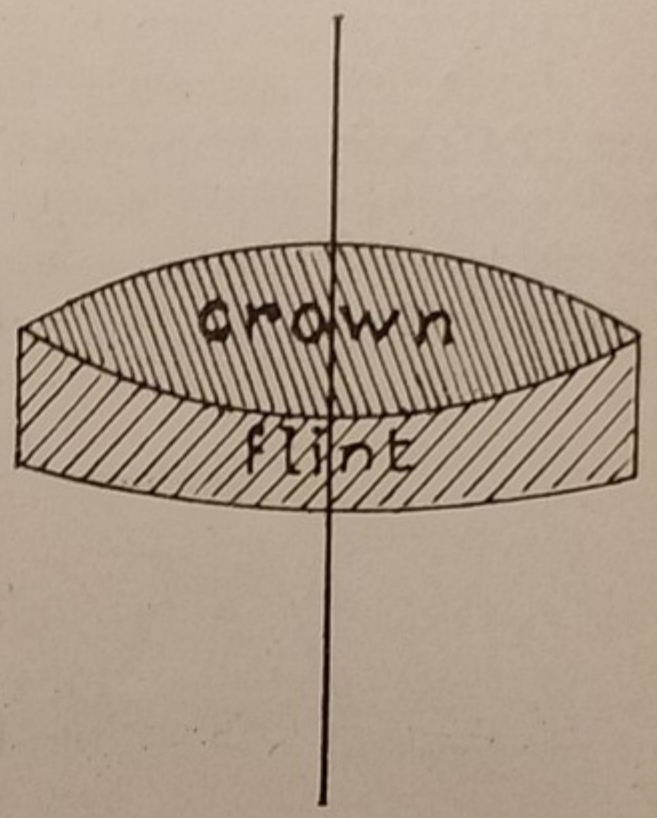


Fig. 127.

i violetti in un punto V, e gli altri colori in punti intermedî. Un punto A non ha più dunque per immagine un altro punto. Ciò produce un difetto nella formazione delle immagini degli oggetti, chiamato **aberrazione cromatica,** per il quale le immagini risultano contornate da bordi colorati, che nuocciono alla nitidezza di esse.

Si corregge questo difetto in modo analogo che nei prismi, mettendo insieme una lente biconvessa di crown ed un menisco divergente di flint, (Fig. 127). Il sistema è meno convergente, cioè ha una distanza focale maggiore, che se si adoperasse la sola lente biconvessa; ma è ancora convergente, e fornisce immagini esenti da bordi colorati. Una tale lente si chiama **lente acromatica**; le curvature delle sue facce si determinano col calcolo. Ne vedremo in seguito l'applicazione in molti strumenti d'ottica.

La visione.

57. **Occhio.** — L'*occhio* è l'organo della vista. Esso è costituito da un bulbo quasi sferico, formato da una membrana esterna coriacea, opaca, bianca, chiamata la **sclerotica** (Fig. 128); la quale anteriormente diventa più convessa e trasparente, e forma la **cornea.** Dietro a questa vi è una membrana, diversamente colorata nei varî individui, che si chiama l'**iride**; essa nel centro ha un foro, chiamato la **pupilla.** L'iride è contrattile, cioè la pupilla ha dimensione variabile; conserva la forma circolare nell'uomo e in altri animali; mentre si restringe in forma lineare in qualche altro caso, come nel gatto. La variazione della pupilla dipende dalla luminosità del-

l'oggetto che si guarda; la pupilla si restringe quando l'oggetto è fortemente illuminato, affinchè la troppa luce non offenda la vista.

Dietro la pupilla vi è una specie di lente biconvessa, chiamata il **cristallino,** formata da un nucleo più rigido, circondato da strati più molli e quindi deformabili; è più convessa nella faccia posteriore.

Il cristallino è sostenuto da numerosi muscoletti contrattili, chiamati i **processi ciliari.** Nell'interno aderisce alla sclerotica una membrana nera, chiamata la **coroide**; essa ha lo stesso ufficio del nero che si dà dentro gli strumenti di ottica, cioè di evitare la diffusione della luce, che produrrebbe l'abbagliamento dell'immagine. La coroide negli albini è incolora; perciò costoro vedono male di giorno; mentre vedono di sera meglio che di giorno, allorchè essendo diminuita la luce è pure diminuito l'abbagliamento dell'immagine.

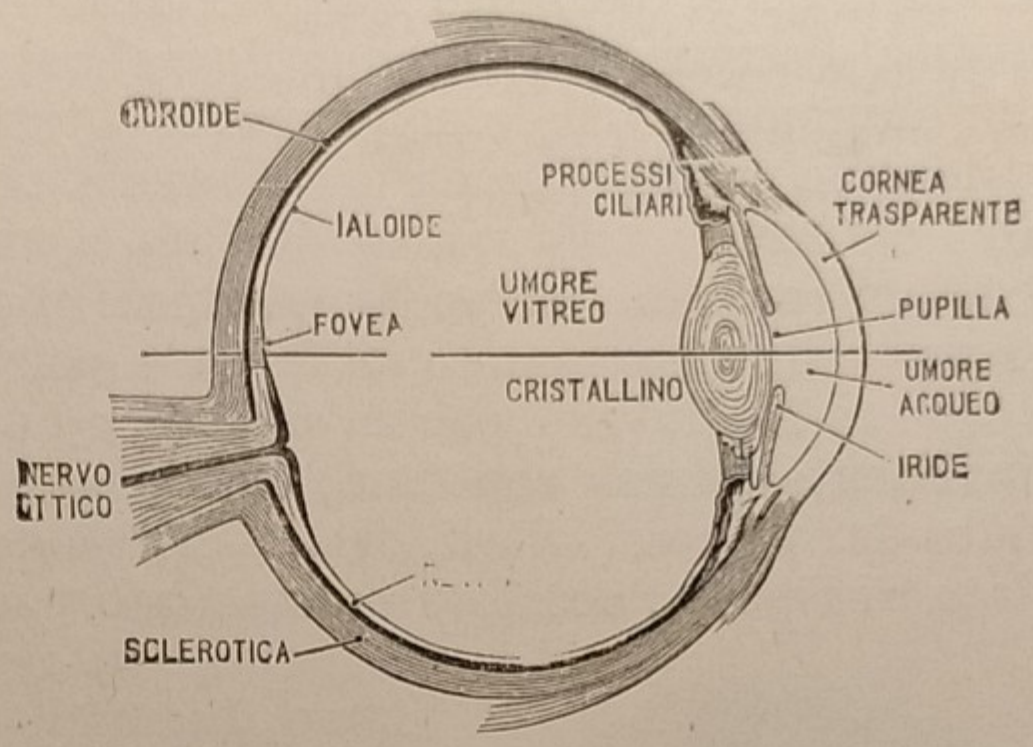


Fig. 128.

Sulla coroide si stende la **retina,** che è la parte sensibile dell'occhio; essa è un'espansione del **nervo ottico** ed è formata da microscopiche fibre filiformi a guisa di piccolissime punte o *conetti*; è di un bel rosso porpora nell'uomo vivente, e di altro colore in altri animali; ma si scolora con la morte. La parte più sensibile della retina è la parte centrale, più gialla, detta **macula lutea,** nel cui centro vi è una fossetta chiamata la **fovea**; mentre all'estremità del nervo ottico vi è un punto insensibile, detto **punto cieco o di Mariotte.** Sulla retina e sulla parte posteriore del cristallino aderisce una membrana sottile e trasparente, detta **ialoide,** che fa da involucro ad un liquido gelatinoso, chiamato **umore vitreo**; mentre nella **camera anteriore** tra il cristallino e la cornea, vi è un altro liquido più fluido, detto **umore acqueo.**

L'occhio pertanto è costituito da diversi mezzi trasparenti: l'umore acqueo, il cristallino, l'umore vitreo, limitati da superfici curve, aventi i centri sulla medesima retta, che è l'asse ottico dell'occhio; ma il complesso è equivalente ad una lente convergente il cui centro ottico è a mm. 15 circa avanti la retina.

58. **Formazione dell'immagine.** — Gli oggetti che guardiamo sono a distanza rilevante, cioè al di là del doppio della distanza focale dell'occhio. La loro immagine è perciò sempre reale, capovolta, impiccolita, (§ 51 - 1). Condizione perchè l'oggetto guardato si veda nitidamente è che *la sua immagine si formi sulla retina.* Ciò è facilmente verificabile con l'esperienza; prendendo l'occhio di un bue e togliendo cautamente la sclerotica nella parte posteriore, senza rompere la retina, ponendo poi una candela accesa avanti ad esso, se ne vede disegnata dietro nitidamente la piccola immagine capovolta. Non sappiamo spiegare come da tale immagine sulla retina, avvenga la percezione normale dell'oggetto, diritto, nella sua grandezza e posizione reale, fuori dell'occhio.

59. **Accomodamento della vista.** — Abbiamo veduto (§ 51) che in una lente convergente variando la distanza dell'oggetto, varia anche la distanza dell'immagine; pertanto nell'occhio le immagini dei varî oggetti, posti a diversa distanza da esso, non dovrebbero formarsi tutte sulla retina; e noi non dovremmo vedere nitidamente a tutte le distanze. Invece l'occhio normale vede nettamente da una distanza minima, che si chiama il **punto prossimo** o *distanza della visione distinta*, a una distanza massima che si chiama il **punto remoto.** Nell'occhio normale il punto prossimo è a 25 cm. di distanza, e il punto remoto all'infinito, poichè scorgiamo nitidamente le stelle.

Questa facoltà dell'occhio si chiama l'**accomodamento**; essa dipende principalmente da una continua, incosciente deformazione del cristallino, compiuta dai processi ciliari, che, come s'è detto, sono muscoli contrattili. Allo stato di riposo l'occhio è accomodato per guardare all'infinito; in tali condizioni, p. es., si trova durante il sonno o quando siamo distratti. Per guardare da vicino facciamo, senza accorgercene, uno sforzo per il quale il cristallino diventa più convesso, cioè più convergente; l'immagine che sarebbe andata più lontana, è ricondotta sulla retina. Ciò è in parte aiutato dal fatto, che si allunga contemporaneamente un poco tutto il bulbo dell'occhio, onde la retina si allontana alquanto.

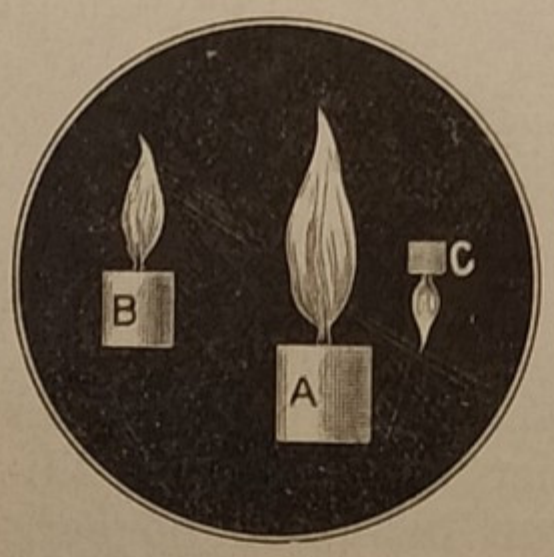


Fig. 129.

A riprova di ciò si ha che mettendo sul bulbo dell'occhio qualche goccia di atropina, questa è assorbita e paralizza i muscoli dell'occhio; l'iride si rilascia e la pupilla si dilata sino al suo massimo diametro, mentre il cristallino si immobilizza e non può più accomodarsi per vedere da vicino.

Ma se ne può fare una dimostrazione sperimentale più diretta, ponendo avanti all'occhio di una persona una candela accesa. Si scorgono in corrispondenza della pupilla tre piccole immagini della fiamma: una *A* (Fig. 129) virtuale, diritta, impiccolita, dovuta alla riflessione della luce sulla cornea, che funziona da specchio convesso; un'altra *B*, anch'essa virtuale, diritta, impiccolita, dovuta alla riflessione sulla faccia anteriore del cristallino, che funziona anch'esso da specchio convesso; e infine una terza immagine *C*, reale, capovolta, impiccolita, dovuta alla riflessione sulla faccia posteriore del cristallino, che funziona da specchio concavo. Facendo fissare con l'occhio dapprima un oggetto lontano e poi un altro vicino, si vedrà che le immagini *A* e *C* non si modificano sensibilmente, mentre l'immagine *B* diventa più piccola. Ciò perchè la faccia anteriore del cristallino è diventata più convessa; mentre le curvature della cornea e della faccia posteriore del cristallino, sono rimaste sensibilmente costanti.

60. **Difetti della vista.** — Con la vecchiaia i processi ciliari s'indeboliscono, mentre il cristallino diventa più rigido e poco deformabile; così l'accomodamento va perdendosi e l'occhio rimane capace di vedere solo alla massima distanza. I vecchi difatti vedono meglio da lontano che da vicino.

Questo difetto, poichè è acquisito con la vecchiaia, si chiama perciò **presbitia.** Si può correggere ponendo avanti agli occhi *lenti convergenti*, che

suppliscono appunto alla deficienza di convergenza del cristallino, allorchè si guarda da vicino. I vecchi quindi mettono gli occhiali quando devono leggere, e li tolgono per vedere da lontano.

Ma vi sono altri difetti dell'accomodamento congeniti dalla nascita, per difettosa conformazione dell'occhio.

La **miopia o brachimetropia** è un difetto per il quale l'occhio vede bene da vicino, anche a pochi centimetri di distanza, ma vede confuso da lontano. Cioè il punto prossimo si avvicina a pochi centimetri; ma anche il punto remoto è a piccola distanza.

Questo difetto è dovuto ad eccesso di convergenza dell'occhio; per cui le immagini degli oggetti lontani si formano al di qua della retina, e su questa sono quindi *sfocate* e confuse.

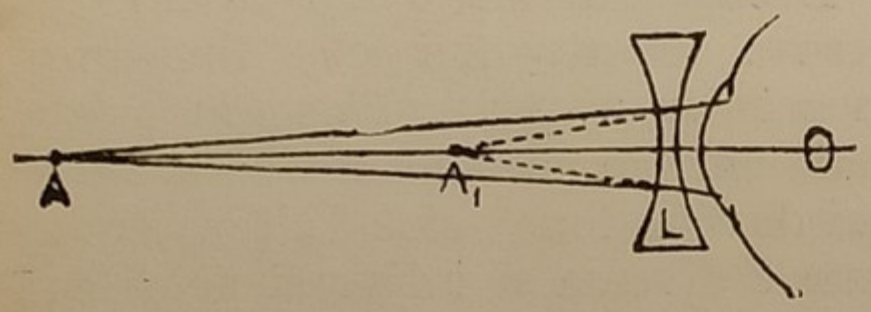


Fig. 130.

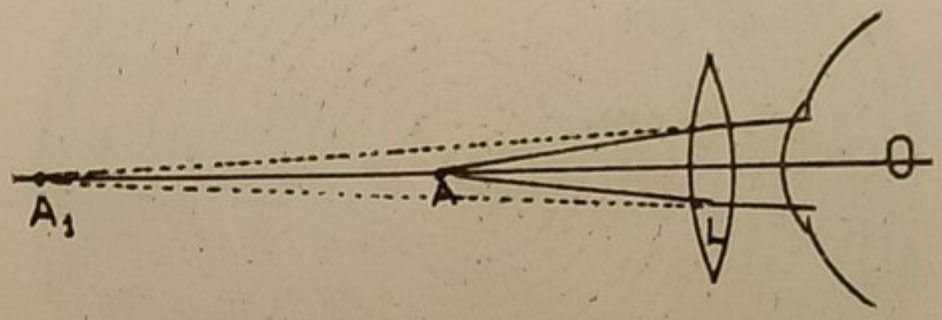


Fig. 131.

Si corregge tale difetto con l'uso di lenti divergenti: i raggi provenienti da un punto A lontano (Fig. 130), passando per la lente L sono resi più divergenti, ed entrano nell'occhio O come se provenissero da un punto A_1 più vicino, entro i limiti della visione distinta del miope. Questi adunque deve mettere gli occhiali per vedere da lontano, e li toglie per leggere.

La miopia si aggrava con l'abitudine di guardare sempre da vicino; vi è infatti la *miopia degli studenti*, che poi con l'età scompare.

L'**ipermetropia** è il difetto opposto, per il quale l'occhio è poco convergente, e le immagini si formano al di là della retina. Esso è un difetto simile alla presbitia, ma che si riscontra anche nei giovani; con questa differenza che essendo integra la facoltà dell'accomodamento, l'ipermetropico riesce a vedere distintamente da lontano, facendo lo stesso sforzo di accomodamento che l'occhio normale fa per vedere da vicino; ma non riesce a vedere bene da vicino.

Si corregge l'ipermetropia con l'uso di lenti convergenti; i raggi provenienti da un punto vicino A (Fig. 131), passando per la lente L escono meno divergenti, ed entrano nell'occhio O come se provenissero da un punto A_1 più lontano, a una distanza a cui l'ipermetropico vede distintamente.

Questi difetti possono essere naturalmente più o meno pronunziati; per correggerli quindi occorrono nei varî casi lenti di diversa distanza focale; o, come si dice, di *grado* o *numero* diverso. Questo numero esprime usualmente la distanza focale in pollici francesi [1]; così, lente per miope di grado 10 vuol dire: lente divergente di $10 \times 2{,}7 = 27$ cm. di distanza focale. Quanto più piccolo è questo numero, tanto più grave è la miopia.

Gli oculisti invece hanno adottato come unità di misura **la diottria** [2]: 1 diottria corrisponde ad una lente di cm. 100 di ditanza focale; 2 diottrie

---

(1) *Un pollice francese* = mm. 27,07.
(2) La *diottria* fu adottata nel Congresso medico internazionale di Bruxelles del 1875.

ad una lente di cm. $^{100}/_{2}$ = cm. 50 di distanza focale; ed in generale n diottrie ad una lente di cm. $^{100}/_{n}$ di distanza focale.

Così, ad es., la lente suddetta di grado 10 corrisponde a $^{100}/_{27} = 3\,^{3}/_{4}$ diottrie circa. Quanto più piccolo è questo numero, tanto meno grave è il difetto.

Poichè la stessa distanza focale può riferirsi tanto ad una lente convergente che divergente, per distinguere con lo stesso numero una lente per presbite da una per miope, si adopera per la lente convergente il segno + (*distanza focale positiva*) e per la divergente il segno — (*distanza focale negativa*).

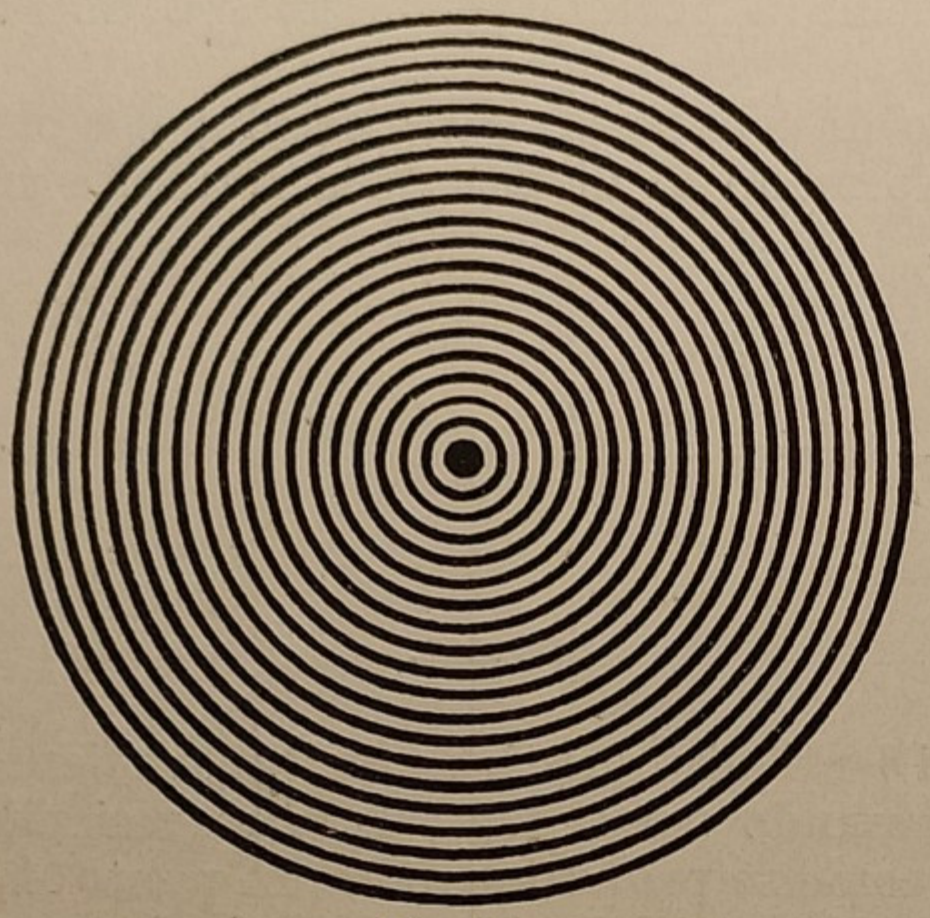


Fig. 132.

L'astigmatismo è un difetto più grave: le superfici che limitano i mezzi rifrangenti dell'occhio, e specialmente la cornea, non sono superfici di rotazione; cioè la loro curvatura è diversa nei diversi piani condotti per l'asse ottico dell'occhio. Variando la curvatura varia anche la convergenza; quindi di tutti i raggi partenti da un punto luminoso, quelli giacenti, ad es., in un piano verticale, incontrano l'occhio con una data curvatura, in modo da essere riuniti in un punto, ad es., sulla retina; quelli invece giacenti in un piano orizzontale incontrano l'occhio con una curvatura diversa, e convergono in un punto diverso dal primo; cioè i raggi provenienti dal punto luminoso, attraversando l'occhio, convergono in punti diversi, secondo il piano in cui giacciono. La conclusione è che ad un punto luminoso non corrisponde come immagine un altro punto; e quindi non si vede nettamente ad alcuna distanza.

Fig. 133.

Questo difetto, più o meno, si riscontra in ogni occhio. Per convincersene, basta guardare la Fig. 132 con un occhio solo; non la si vedrà nettamente in tutte le direzioni; ma vi saranno due settori opposti secondo cui le circonferenze appariranno più confuse.

Si corregge questo difetto per mezzo di lenti che modificano la convergenza dei raggi in un piano più che in un altro; tali sono le **lenti cilindriche**, cioè limitate da facce appartenenti a superfici cilindriche. Esse non modificano la direzione dei raggi giacenti in un piano che contiene gli assi (paral-

leli) delle due facce cilindriche; mentre modificano al massimo grado la convergenza dei raggi che giacciono in un piano perpendicolare a tali assi. La Fig. 133 mostra come viene modificata l'immagine con una lente cilindrica.

Nella scelta di queste lenti occorre definire non solo la curvatura delle facce ma anche la direzione dell'asse rispetto alla congiungente i centri delle due pupille.

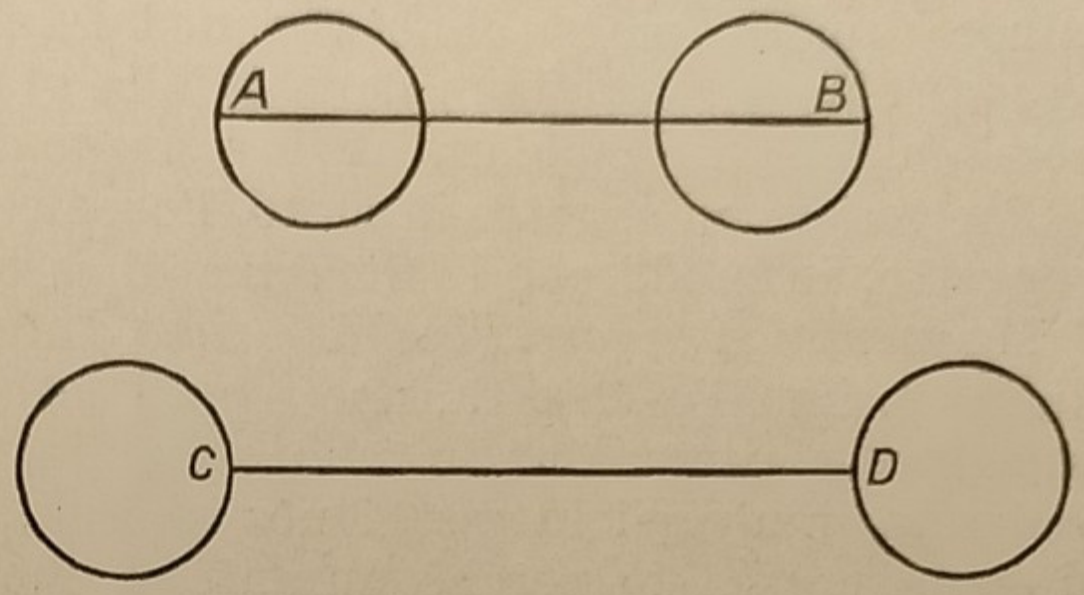


Fig. 134.

Fig. 135.

Daltonismo è un difetto per il quale si percepiscono falsati alcuni colori; manca, più frequentemente, la percezione del rosso, anche se esso è unito ad altri colori per formare un colore composto. Questo difetto, per fortuna assai raro, dipende da mancanza di sensibilità di alcune fibre della retina, e quindi non si può correggere in alcun modo.

Si suppone cioè, che la percezione dei varî colori dipenda dall'esistenza nella retina di tre ordini diversi di fibre; uno sensibile al rosso, uno al giallo, uno all'azzurro. Essi sono detti i *colori fondamentali*; dalla fusione in varia misura di essi, nascono tutti gli altri colori intermedi dello spettro solare.

Vi sono altri difetti, derivanti da altre cause, e che spesso ci inducono ad una falsa percezione degli oggetti; cioè il nostro occhio è soggetto a numerose *illusioni ottiche*. Per citare qualche esempio, osserviamo la Fig. 134; quale dei due segmenti è più lungo: AB oppure CD? Verificate col compasso. Osserviamo ora la Fig. 135: come sembrano le linee AB, CD, EF, GH? Provate a vedere come sono, servendovi della riga.

61. **Persistenza delle immagini sulla retina.** — Tutte le nostre sensazioni si formano e si cancellano con un piccolo ritardo. Così, se un oggetto scompare istantaneamente avanti all'occhio, la sua immagine persiste ancora un istante sulla retina: cioè *continuiamo a vederlo ancora per circa un decimo di secondo dopo la sua scomparsa.*

Per questa ragione un oggetto luminoso, ad es. un tizzone acceso, in rapido movimento, ci appare come una striscia luminosa continua; infatti quando vediamo l'oggetto in fine della sua traiettoria, lo vediamo ancora in tutti i punti precedenti che l'oggetto ha percorso entro un decimo di secondo; parimenti una luce a rapide intermittenze ci appare continua: un lampo, la cui durata non supera un decimillesimo di secondo, lo vediamo per un tempo maggiore di un decimo di secondo, ecc.

62. **Percezione del movimento.** — La visione più netta di un oggetto (piccolo, da assimilarsi a un punto) avviene quando la sua immagine si forma nella fovea; negli altri punti la retina ha sensibilità minore, e tanto minore quanto più si allontanano dalla fovea. La percezione nitida degli oggetti che ci circondano deriva dalla grande mobilità dell'occhio, per cui possiamo portare rapidamente lo sguardo da un punto all'altro attorno a noi.

Per vedere un oggetto in moto, l'occhio deve perciò muoversi, per seguire l'oggetto, in modo che l'immagine di esso si mantenga sulla fovea.

Ma *mentre si muove, l'occhio è cieco.* Infatti guardiamo prima l'occhio sinistro e poi l'occhio destro della nostra immagine in uno specchio; noi non vediamo muoversi in essa i nostri occhi, che pur si sono mossi; ciò perchè durante il movimento, non vedono.

Ne deriva questa contraddizione: per vedere un oggetto in moto l'occhio deve muoversi; ma durante il movimento non vede; pure noi vediamo l'oggetto in moto. La contraddizione è solo apparente; l'occhio non si muove con continuità, ma a scatti rapidissimi e brevissimi (parecchie decine al secondo), fermandosi ad ogni scatto un attimo, durante il quale vede l'oggetto come se fosse fermo; dunque:

di un oggetto in moto l'occhio percepisce una serie di immagini successive, ciascuna per un momento come se l'oggetto fosse fermo.

Fig. 136.

63. **Cinematografo.** — Alla condizione precedente dobbiamo soddisfare, per riprodurre il movimento con fotografie, come avviene **nel cinematografo** (1). Si ha una **pellicola,** a forma di lungo nastro (**film**), su cui sono una accanto all'altra numerose fotografie, prese con una macchina speciale, in numero di circa 20 al minuto secondo, riproducenti le diverse e successive posizioni di un oggetto in movimento. La Fig. 136 rappresenta al naturale un pezzo di tale pellicola. Queste fotografie con un *apparecchio di proiezione* (§ 69) si proiettano, molto ingrandite, su uno schermo, una dopo l'altra; facendo svolgere la pellicola con speciale meccanismo, non con moto uniforme, ma a scatti; in modo che ciascuna immagine sia ferma per il breve tempo in cui è proiettata sullo schermo; mentre si chiude automaticamente la proiezione, con apposito otturatore, per il tempo in cui vi è il cambio fra un'immagine e la successiva. Così l'occhio percepisce le successive fasi del movimento,

---

(1) L'invenzione del cinematografo nella forma attuale, fu fatta dal celebre inventore americano Edison, sul finire del secolo passato; e divulgata dai fratelli Lumière, francesi, nel 1895, ai quali è dovuta l'applicazione della lampada di proiezione all'apparecchio dell'Edison.

che per la persistenza delle immagini sulla retina si fondono in una sensazione unica e si ha l'illusione completa del moto reale.

La Fig. 137 mostra una macchina da proiezione cinematografica; la pellicola si svolge dal rotolo R e si avvolge sul rotolo S; l'otturatore è rappresentato in O. Del **cinema sonoro** daremo un cenno nel § 368.

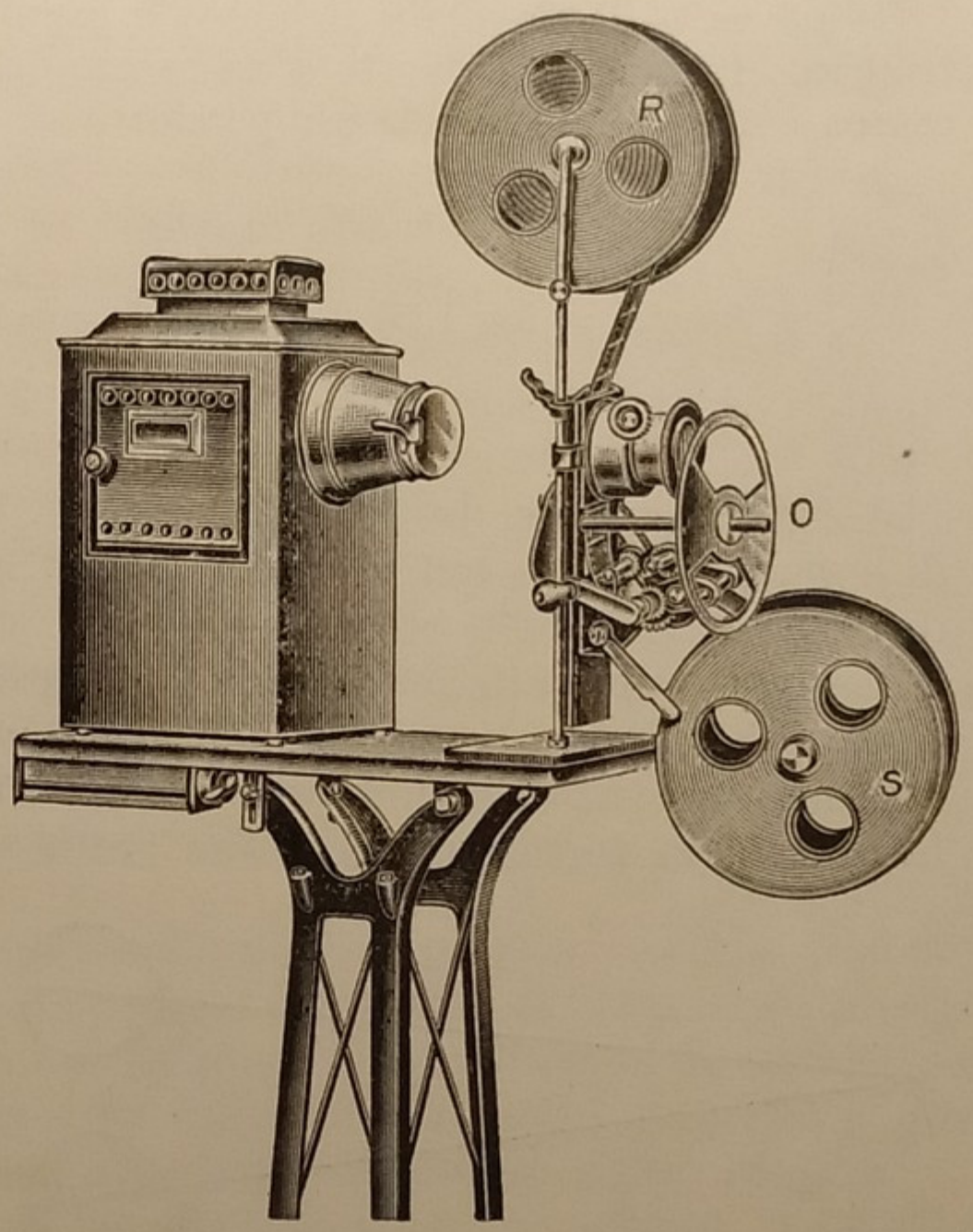


Fig. 137.

64. **Visuale - Grandezza apparente - Acuità visiva.** — **Visuale** di un punto è la congiungente il centro ottico dell'occhio con tal punto.

Un oggetto AB (Fig. 138) è veduto compreso fra le due visuali OA ed OB che passano per i suoi estremi. L'angolo AOB si chiama **angolo visuale,** e determina la **grandezza apparente** dell'oggetto. Cioè noi vediamo egualmente grandi varî oggetti $AB - A_1B_1 - A_2B_2$.... di diversa grandezza, ma posti a diversa distanza, purchè abbiano tutti lo stesso angolo visuale.

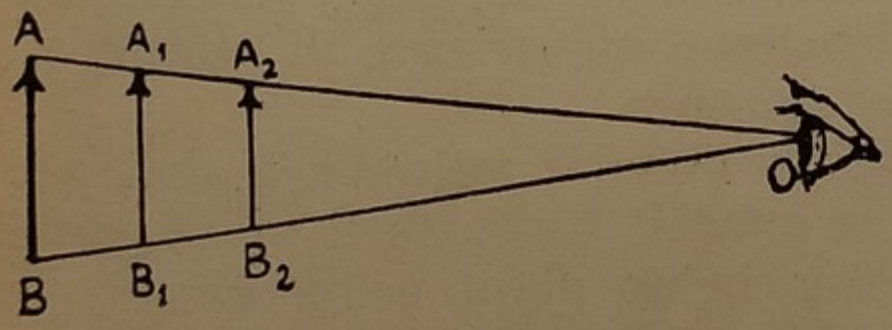


Fig. 138.

Perchè due punti luminosi si possano percepire distinti, occorre che le loro immagini si formino in due conetti (§ 57) diversi della retina; siccome la distanza di due di questi consecutivi è di circa mm. 0,003, ne deriva che non si possano vedere distinti due punti, se la loro distanza è minore di circa mm. 0,002, a cui corrisponde un angolo visivo di circa $30''$. Ciò prova che questi conetti sono gli ultimi elementi sensitivi della retina, e spiega come la visione sia più distinta allorchè l'immagine si forma sulla fovea, ove i conetti sono più fitti.

L'occhio adunque non può percepire un oggetto, se il suo diametro apparente è minore del suddetto angolo di $30''$; ciò nelle migliori condizioni, allorquando l'oggetto è bianco su fondo scuro, ed è vivamente illuminato. Nelle condizioni ordinarie il diametro apparente non deve essere inferiore ad $1'$ o $2'$ ed il valore di tale angolo misura l'*acuità visiva* dell'occhio. Nella pratica gli oculisti valutano l'acuità visiva dalla grandezza dei caratteri che l'occhio riesce a leggere distintamente alla distanza di 5 metri. L'acuità visiva varia con l'età: è massima a 14 anni, si mantiene costante sino a circa 30 anni, indi diminuisce più rapidamente.

Problema. — *Qual'è l'angolo visuale di una persona alta m.1,70, posta a m.12 di distanza?*

Soluzione. — L'angolo α richiesto è (approssimativamente) l'angolo acuto di un triangolo rettangolo, opposto a un cateto della lunghezza di m.1,70, e di cui l'altro cateto è lungo m.12. Si avrà perciò:

$$1{,}70 = 12 \operatorname{tang} \alpha; \qquad \text{cioè:} \qquad \operatorname{tang} \alpha = \frac{1{,}70}{12}, \qquad \text{da cui:}$$

$$\log \operatorname{tang} \alpha = \log 1{,}70 + \operatorname{colog} 12 = \bar{1},15127; \qquad \text{e con le tavole si ricava:}$$

$$\alpha = 8^{\circ}\,3'\,48''.$$

65. **Percezione delle distanze.** — Da che proviene la percezione delle diverse distanze a cui vediamo i varî oggetti, pur formandosi le immagini di essi sempre sulla stessa superficie, cioè sulla retina?

La percezione delle distanze dipende dalla visione contemporanea coi due occhi; di uno stesso punto si formano due immagini, una per ciascun occhio; pur tuttavia noi percepiamo un punto solo. Ciò avviene se le due immagini si formano sulle due retine in punti disposti omologamente, o come si dice, *in punti corrispondenti*. Infatti, se mentre guardiamo i caratteri del libro, spostiamo col dito il bulbo di uno dei due occhi, vediamo subito sdoppiarsi l'immagine.

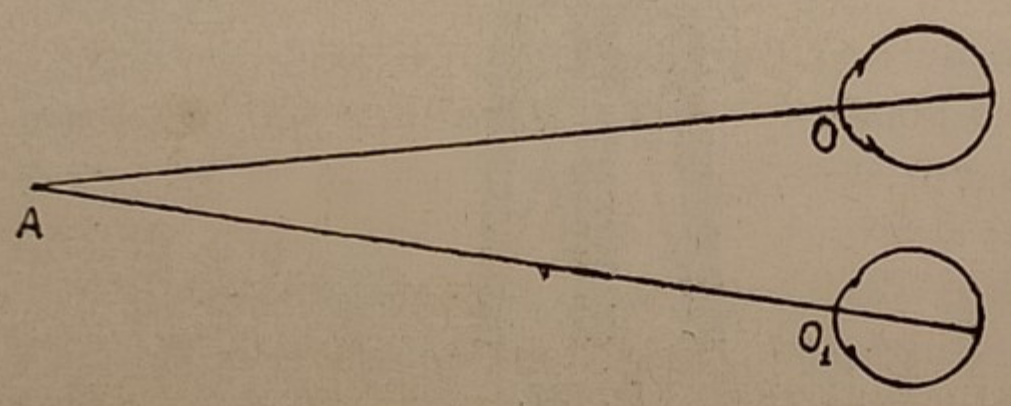


Fig. 139.

Ora, perchè di punti posti a diversa distanza si formino le immagini in punti corrispondenti, occorre disporre i due occhi in modo che le due visuali OA ed O_1A (Fig.139) concorrano nel punto A che si guarda. L'angolo OAO_1 di queste visuali si chiama **angolo ottico**; esso diminuisce man mano che il punto A si allontana; fino a diventare zero se il punto è infinitamente lontano, cioè allorchè le due visuali sono parallele. Ora, la valutazione incosciente di questo angolo è ciò che ci dà la sensazione della distanza.

Guardando con un occhio solo quindi non si possono valutare le distanze; provando a chiudere un occhio, ci sembra infatti che tutto il mondo esteriore si appiattisca e si riduca ad una scena in un piano solo, come in un quadro.

66. **Percezione del rilievo - Stereoscopio.** — La valutazione delle distanze dei varî punti di un oggetto, è causa della percezione del rilievo. Ma vi concorre un'altra condizione importante: le immagini dello stesso oggetto, che si formano nei due occhi, sono leggermente diverse, essendo i due occhi posti in posizione diversa rispetto all'oggetto. D'altra parte queste due immagini devono fondersi in una sola, perchè l'oggetto lo vediamo unico e non doppio:

Dalla fusione in una sola delle due immagini alquanto diverse, formate nei due occhi, nasce il rilievo.

Sicchè il rilievo dipende anch'esso dalla visione binoculare; con un occhio solo esso non si percepisce. La prova di ciò si ha nel fatto che possiamo otte-

nere il rilievo con immagini fotografiche, cioè giacenti in un piano, purchè si obbedisca alla condizione detta or ora.

Ciò si ottiene con lo **stereoscopio**, che appunto serve a farci vedere in rilievo fotografie o altre figure ottenute col disegno. La teoria di questo apparecchio è la seguente: Siano O ed O' due lenti convergenti *eguali*, cioè della stessa distanza focale; esse talvolta sono due pezzi di una medesima lente. Si pongano coi centri alla distanza delle due pupille, e con gli assi ottici convergenti nello stesso punto C (Fig. 140), alla distanza della visione distinta. Siano a e b due fotografie dello stesso soggetto, ma *prese da punti diversi*; il che si può ottenere o con una macchina sola prendendo le due fotografie successivamente, spostando la macchina, o meglio (trattandosi di oggetti in moto, per ottenere le due fotografie nel medesimo istante) con macchine fotografiche apposite, aventi doppio obiettivo, chiamate appunto **macchine stereoscopiche.**

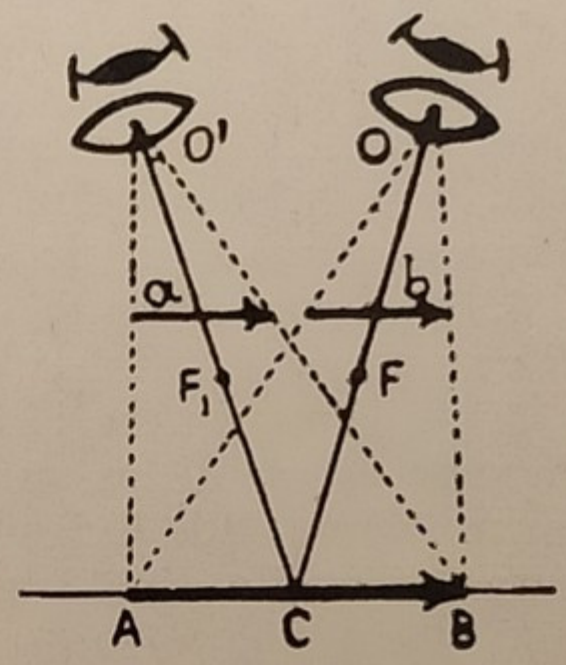


Fig. 140.

Adunque a e b non sono due copie della stessa fotografia, come può sembrare a prima vista; se ne possono scorgere le piccole differenze di prospettiva, confrontando in ciascuna di esse la posizione degli oggetti più vicini rispetto a quelli lontani formanti lo sfondo della veduta.

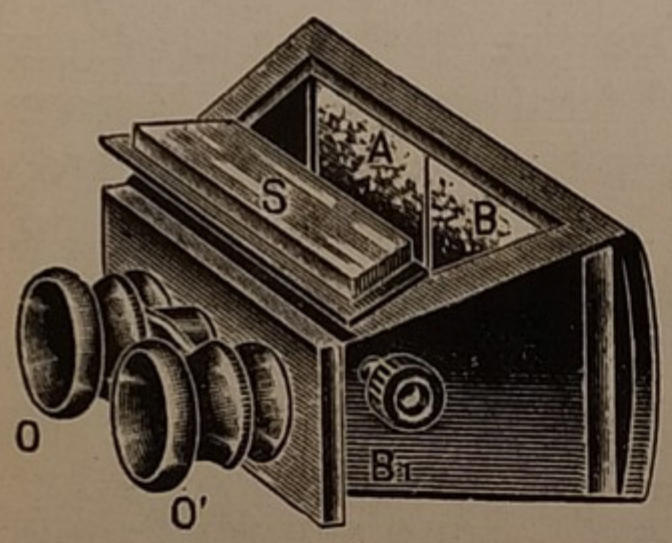


Fig. 141.

Tali figure sono collocate ognuna tra il fuoco F e ciascuna delle due lenti O ed O'. Di esse si formano allora immagini virtuali, ingrandite, diritte (§ 51-5) sovrapponentisi entrambe in AB [1]. Gli occhi posti sopra le lenti O ed O' vedono in AB *una sola immagine, ma in rilievo.*

La Fig. 141 rappresenta una delle forme più comuni dello stereoscopio. Le due fotografie A e B sono poste al fondo di una scatoletta trapezoidale e s'infilano da una fenditura laterale della scatola; se sono su carta, cioè opache, vengono illuminate da uno specchietto S a cerniera, che rifletta sulle vedute la luce di una finestra o di una lampada; se sono su vetro, cioè trasparenti, sono illuminate di dietro, essendo il fondo della scatoletta di vetro smerigliato. Le due lenti sono nei tubi O ed O'; un bottone B_1 con cremagliera, avvicina più o meno le lenti alle fotografie, per *mettere a fuoco* le immagini a secondo delle diverse viste.

---

(1) In questo, come negli altri strumenti d'ottica, riporteremo costruzioni semplificate per la formazione delle immagini. Partendo dal fatto che le immagini dovranno formarsi in posizione da noi prefissata, per raggiungere un dato scopo, per ottenere l'immagine di un punto basterà trovare l'intersezione dell'asse secondario partente da tal punto con il piano prefissato in cui deve formarsi l'immagine.

Problemi da risolvere.

1. Qual'è il grado di una lente di 6 diottrie? A quante diottrie equivale una lente della distanza focale di 20 cm.?

2. Su un disco di metallo è praticata una corona di 20 fori equidistanti tra loro e dal centro del disco, attraverso uno dei quali passa un fascio di raggi paralleli, raccolti su uno schermo. Con che velocità minima deve ruotare il disco attorno al suo asse, perchè sullo schermo si osservi illuminazione continua?

3. A che distanza deve collocarsi un bastone di m. 1,50, perchè abbia la stessa grandezza apparente di un cerino lungo mm. 25, alla distanza della visione distinta?

4. L'angolo ottico di un punto è di 18°, la distanza tra i centri delle due pupille di una persona è di mm. 65. A che distanza dagli occhi è il punto?

5. La distanza fra i centri delle due pupille di una persona è di mm. 70. Qual'è l'angolo ottico di un punto posto a mm. 113 da ciascuna pupilla? (Si può risolvere senza l'aiuto della Trigonometria, osservando che il segmento di 70 mm. è la sezione aurea di quello di 113 mm.).

Strumenti ottici.

67. **Strumenti ottici.** — L'uso di lenti e di specchi è antichissimo. Le lenti si conoscevano molti secoli fa; si cita una lente piano-convessa di cristallo di rocca, rinvenuta a Khorsabad tra le rovine di Ninive, ed una lente di vetro scoperta in una tomba romana. Dicesi anche che Nerone, miope, allorchè assisteva ai combattimenti dei gladiatori, portava all'occhio uno smeraldo concavo a guisa di occhialino. Ma si attribuisce a Bacone, sei secoli fa, la costruzione e l'uso delle prime lenti d'ingrandimento.

Si dicono **strumenti ottici** quegli apparecchi formati da mezzi rifrangenti o da specchi, che permettono di osservare gli oggetti in condizioni diverse, e naturalmente migliori, che direttamente con l'occhio.

Si distinguono in due categorie: *semplici* e *composti*. Sono semplici quelli in cui la formazione dell'immagine dipende da un solo elemento ottico (come, ad es., una sola lente o un solo specchio); sono composti quelli formati dall'unione di più elementi ottici.

Tra gli strumenti ottici semplici descriveremo: la *macchina fotografica*, l'*apparecchio di proiezione* ed il *microscopio semplice*; gli altri sono tutti composti.

68. **Macchina fotografica - Aberrazioni dei sistemi ottici.** — Per ottenere le immagini da riprodurre con *la fotografia* occorre la **macchina fotografica**; la quale comunemente è formata da un'assicella a cui è fissato l'**obiettivo** O (Fig. 142), che è un sistema di lenti equivalente ad una lente convergente. Si adopera un sistema composto, anzichè una semplice lente, per correggere le deformazioni e i difetti che presentano le immagini ottenute con una sola lente. Questi difetti sono di diverse specie:

1. Le **aberrazioni di sfericità,** dovute al fatto che la lente non è mai di piccola apertura (§ 47). Avviene inoltre che un oggetto esteso AB, posto in un piano perpendicolare all'asse ottico di una lente O (Fig. 143), ha i punti estremi A e B ad una distanza dalla lente maggiore che il punto

centrale C; quindi le immagini A_1 e B_1 dei primi, si formano più vicine ad O che quella C_1 di C. L'immagine dell'oggetto piano ACB sarebbe netta su una superficie curva $A_1C_1B_1$. Ora, siccome solitamente l'immagine si raccoglie su uno schermo piano, avverranno due inconvenienti:

a) l'immagine è deformata, risultando dalla applicazione di una figura curva su un piano. Queste distorsioni sono tali, che di un reticolato a tratti paralleli e incrociati come $ABCD$ (Fig. 144) si ottiene un'immagine come in $A'B'C'D'$ (*distorsione a barile*) o come in $A''B''C''D''$ (*distorsione a cuscino*);

b) l'immagine non è nitida in tutti i punti; se lo schermo è vicino a C_1 (Fig. 143), l'immagine è netta nel centro e confusa alla periferia; se lo schermo passa per A_1B_1, avviene il contrario.

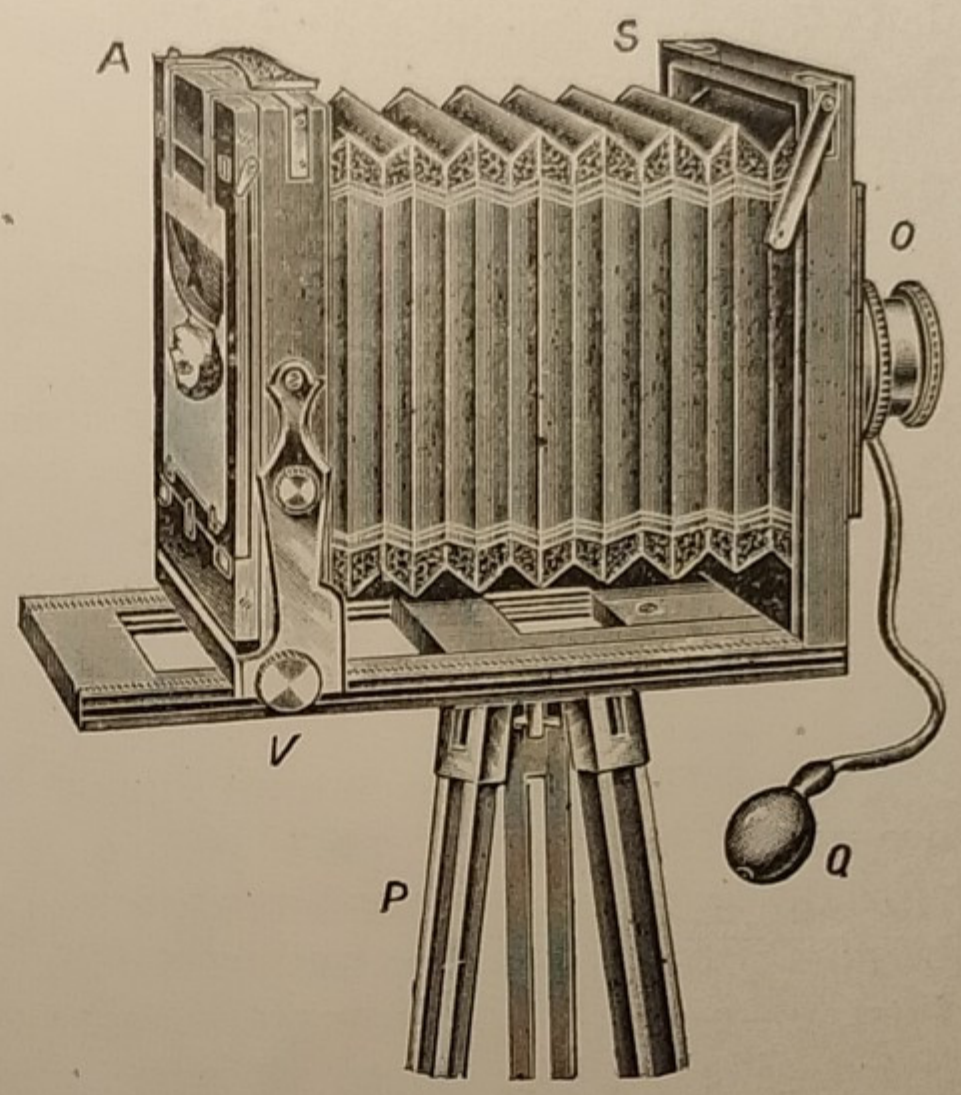


Fig. 142.

Si correggono questi difetti con la sovrapposizione di più lenti, di forma e curvatura opportunamente studiata. Un obiettivo esente da distorsioni, per cui cioè l'immagine è simile geometricamente all'oggetto, si chiama **rettolineare.** Un obiettivo che forma in un piano l'immagine di un oggetto pure contenuto in un piano, si chiama **aplanatico.**

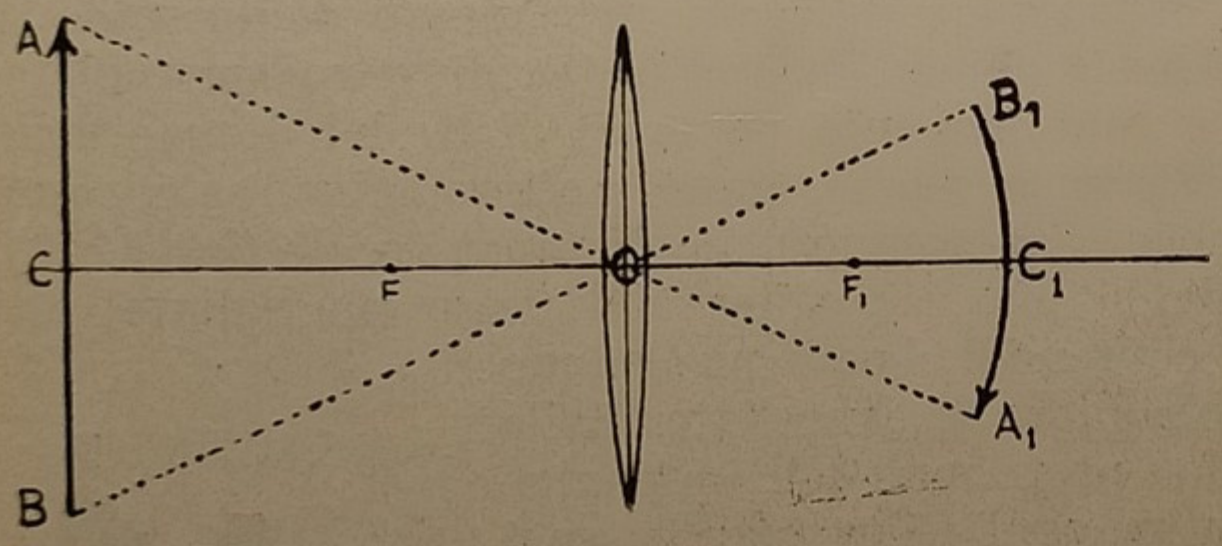


Fig. 143.

2. L'**astigmatismo,** dovuto a varie cause, per cui a un punto dell'oggetto non corrisponde nell'immagine un altro punto. Ciò concorre a far sì, come nel caso precedente, che l'immagine non è netta per tutta l'estensione della figura. Anche questo difetto si corregge con l'abbinamento di più lenti. Un obiettivo corretto da questo difetto si chiama **anastigmatico.**

3. Le **aberrazioni cromatiche,** di cui parlammo al § 56; indicammo allora come si correggono. Un obiettivo esente da questo difetto si chiama **acromatico.**

La Fig. 145 mostra in sezione uno dei migliori *obiettivi anastigmatici* per fotografia, costruito dalla Casa Koritska di Milano.

Tutti i difetti dell'obiettivo si attenuano tanto più, quanto più piccolo è il **diaframma,** il quale limita il passaggio dei raggi solo nella parte centrale della lente; cioè diminuisce l'apertura di questa. D'altra parte non si può impiccolire quanto si vuole l'apertura del diaframma, perchè con ciò l'immagine si rende meno luminosa.

Il diametro del diaframma va computato in rapporto alla distanza focale dell'obiettivo; così $F : 32$ vuol dire un diaframma il cui diametro sia $^1/_{32}$ della distanza focale. Gli obbiettivi più luminosi oggi costruiti, sono quelli che comportano un diaframma sino a $F : 2{,}5$.

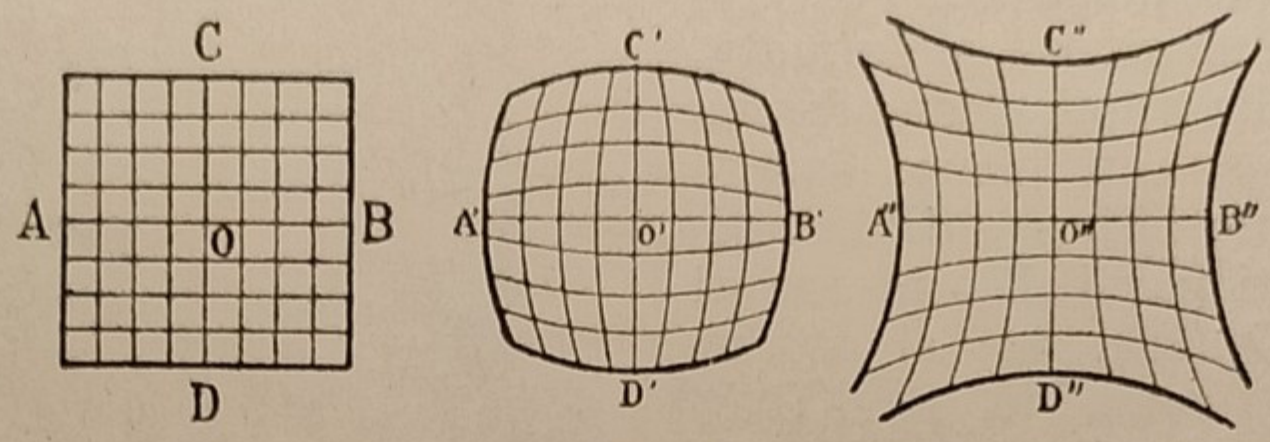


Fig. 144.

Un difetto che non si può correggere è la deformazione dell'immagine, dovuta al fatto che le parti più vicine dell'oggetto da fotografare, vengono riprodotte in proporzione maggiore delle più lontane, in modo che risulta falsato il rapporto di grandezza delle diverse parti dell'oggetto fotografato. Così, ad es., la Fig. 146 mostra come vengono riprodotti in dimensioni esagerate i piedi e le mani di una persona, in confronto della testa; e la Fig. 147 mostra come è sproporzionatamente grande la testa di un cavallo, rispetto alle parti posteriori. Tale difetto si potrà rendere trascurabile solo con una scelta giudiziosa della posizione della macchina fotografica, rispetto agli oggetti vicini della veduta da fotografare.

All'assicella che porta l'obiettivo è collegato, per mezzo di un soffietto di pelle *S* (Fig. 142) un telaio *A* chiuso da una lastra di **vetro smerigliato.** L'oggetto da fotografare è comunemente posto al di là del doppio della distanza focale dell'obiettivo; se ne forma quindi un'immagine reale, capovolta, impiccolita, tra il fuoco ed il doppio della distanza focale (§ 51, N. 1). Essendo un'immagine reale, si può raccogliere sul vetro smerigliato; e si guarda dietro ad esso, coprendola con un panno oscuro, perchè non sia abbagliata e cancellata dalla luce ambiente. Poichè la posizione dell'immagine varia con quella dell'oggetto, ogni volta occorre spostare il vetro smerigliato, per mezzo di una cremagliera *V*, e portarlo avanti e indietro fino a che l'immagine vi si scorge ben nitida; questa operazione si chiama **messa a fuoco.**

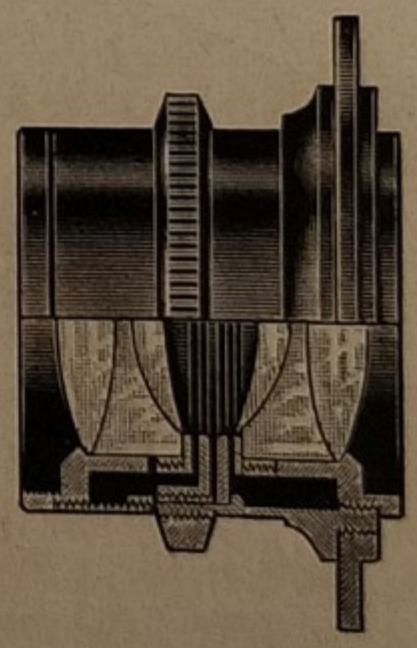


Fig. 145.

All'obiettivo è annesso l'**otturatore**, che serve per aprire e chiudere l'obiettivo, in modo che l'immagine si formi sul vetro smerigliato per un tempo prefissato (in generale una frazione di secondo), chiamato il *tempo di posa.* Vi sono diverse forme di otturatori, che non descriviamo; ve n'è di quelli che permettono la posa di $^1/_{2000}$ di secondo. La manovra dell'otturatore si eseguisce mediante la compressione di una pera di gomma *Q*, o in altre maniere diverse. Daremo un cenno in seguito (§ 122) del procedimento chimico per ottenere le fotografie.

Fig. 146.

Fig. 147.

Problema. — *Un treno che corre con la velocità di 72 km. l'ora, è fotografato lateralmente dalla distanza di m. 200, con un apparecchio fotografico la cui distanza focale è di cm. 25. Quale dev'essere la durata della posa, perchè l'immagine non si sposti più di 0,2 mm?*

Soluzione. — Allo spostamento dell'immagine di mm. 0,2 = cm. 0,02 corrisponde lo spostamento x dell'oggetto, tale che (§ 52):

$$\frac{0{,}02}{x} = \frac{25}{20\,000};$$

avendo preso la distanza dell'immagine dalla lente sensibilmente uguale alla distanza focale. Risolvendo si ottiene:

$$x = \text{cm.}\ \frac{0{,}02 \times 20\,000}{25} = \text{cm. } 16.$$

La velocità di km. 72 l'ora corrisponde a cm. $\frac{7\,200\,000}{3\,600}$ al s. = $^{cm}/_{s}$ 2 000. Il treno perciò si sposta di cm. 16 nel tempo (Vol. 1°, § 28-2):

$$t = \frac{s}{v} = \text{sec.}\ \frac{16}{2\,000} = \mathbf{0{,}008s.}$$

69. **Apparecchio di proiezione.** — L'**apparecchio di proiezione** è anche l'antica *lanterna magica*, nota sin dall'antichità, poichè ne fu trovata una tra le rovine di Ercolano; ma fu ricostruita da padre Kircher verso il 1645. Esso serve per ottenere su uno schermo immagini ingrandite di piccoli oggetti.

Sia O (Fig. 148) una lente convergente, chiamata l'**obiettivo**; se tra il fuoco e la doppia distanza focale di essa si pone un oggetto AB, se ne

ottiene un'immagine A_1B_1 capovolta, ingrandita, al di là del doppio della distanza focale, reale e quindi raccoglibile su uno schermo S, (§ 51 - 3).

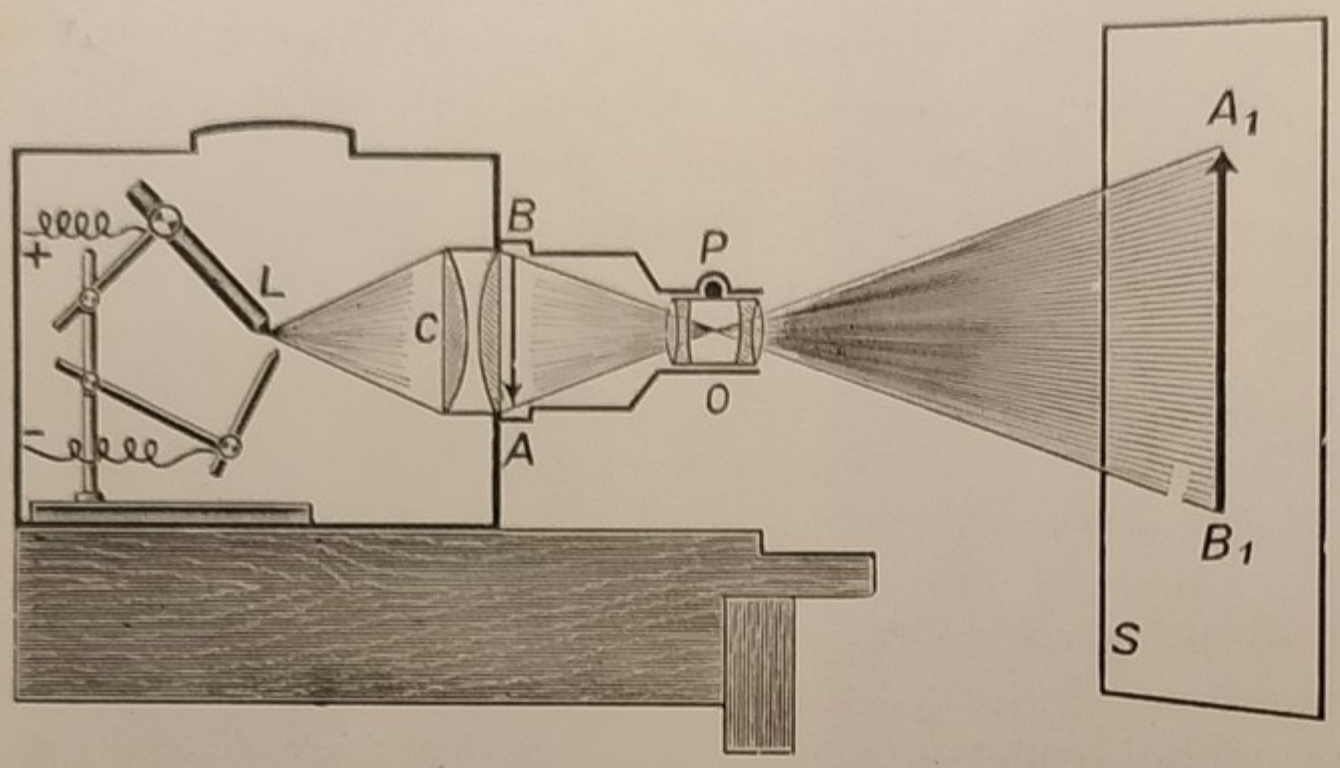


Fig. 148.

Ma essendo ingrandita l'immagine risulta oscura: perchè sia ben visibile occorre che l'oggetto sia fortemente illuminato. Questo potrebbe essere un oggetto reale in rilievo, o una fotografia comune; ma un oggetto in rilievo non è adatto perchè i diversi suoi punti si troverebbero a diversa distanza dall'obiettivo, e non potrebbero formare l'immagine sullo stesso schermo. Vi sono apparecchi di proiezione che proiettano l'immagine di una fotografia o di un disegno comune; ma in tal caso, pur illuminando fortemente l'oggetto, è sempre piccola la quantità di luce che da esso perviene allo schermo, trattandosi di luce emanata per diffusione; quindi non si possono ottenere che ingrandimenti limitati, (*proiezione episcopica*).

Comunemente l'oggetto è una fotografia (o figura disegnata a mano) trasparente, su vetro o celluloide (*proiezione diascopica*); essa si chiama la **diapositiva,** ed ha ordinariamente la forma di un rettangolo di cm. (8,5 × 10), ma di cui l'immagine copre solo la parte centrale, per un quadrato di cm. 7 di lato.

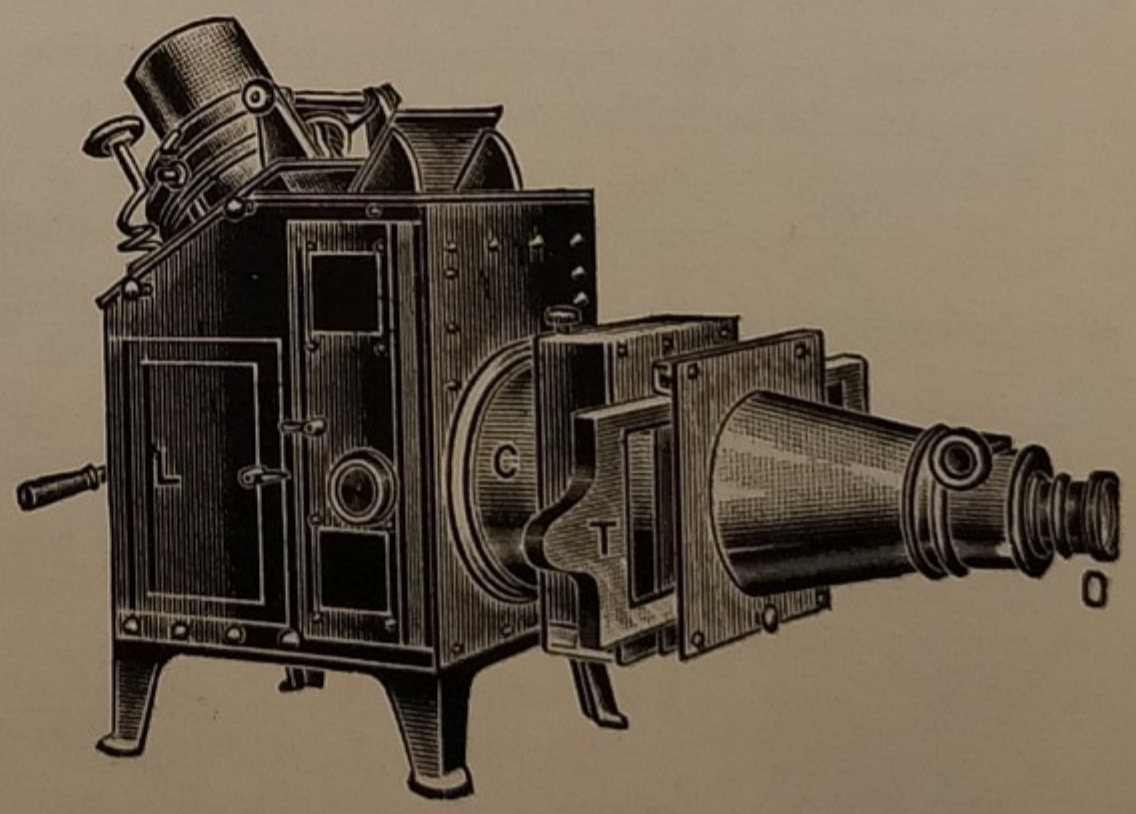


Fig. 149.

L'illuminazione della diapositiva si ottiene per mezzo di una forte sorgente luminosa L, che deve essere di grande intensità, ma di piccola estensione; la lampada che soddisfa meglio a questa condizione, è quella elettrica ad arco voltaico (§ 286); dànno pure buon risultato lampade mezzo-watt (§ 285) col filamento aggruppato in modo conveniente. Ma non tutti i raggi che partendo da L attraversano la diapositiva, potrebbero poi entrare nell'obiettivo, il cui diametro è di pochi centimetri; e sullo schermo verrebbe illuminata solo una piccola parte centrale della immagine; è necessario perciò che tutti i raggi che attraversano la diapositiva, vengano resi convergenti e concentrati nell'obiettivo.

Ciò si ottiene mediante il **condensatore** C, che è un sistema fortemente convergente, formato da due lenti *piano-convesse*, disposte una accanto all'altra in modo da rivolgersi le convessità; i raggi partenti da L sono così resi convergenti, attraversano la diapositiva AB, ed entrano nell'obiettivo; l'immagine sullo schermo è ora completa. Per ottenere sullo schermo l'immagine diritta, la diapositiva si deve mettere capovolta.

In pratica, la lampada è contenuta in un'apposita lanterna L (Fig. 149); la diapositiva è portata da un telaio T scorrevole, doppio, che permette il cambio della figura nel tempo che un'altra è proiettata sullo schermo; l'obiettivo O anzichè di una sola lente è composto di più lenti, che pur equivalendo ad una sola lente convergente, fornisce immagini più corrette, come abbiamo visto per l'obiettivo della macchina fotografica (§ 68).

L'ingrandimento che si può ottenere dall'apparecchio di proiezione, dipende essenzialmente dall'intensità della luce di cui si dispone; i maggiori ingrandimenti si raggiungono nel cinematografo, ove una piccola fotografia di circa cm. 2 d'altezza viene proiettata sino a m. 4 e più, cioè con un ingrandimento di 200 volte; ma in questo caso viene adoperata una lampada ad arco equivalente a circa 50000 *candele* (§ 81).

Recentemente a Berlino è stato costruito un apparecchio di proiezione, che permette la proiezione di figure sulle nubi, disponendo di una sorgente luminosa dell'intensità di 1,5 milioni di *candele*.

Problema. — *L'obiettivo di un apparecchio di proiezione ha la distanza focale di cm. 15. A che distanza deve essere lo schermo, delle dimensioni di m. 4 × 4, per essere coperto completamente dall'immagine di una diapositiva normale?*

Soluzione. — Il lato della diapositiva normale è: $l_1 = \text{cm. } 7$; il lato dell'immagine è: $l_2 = \text{cm. } 400$. Per la formula dell'ingrandimento (§ 52 - 5) dev'essere:

$\frac{l_2}{l_1} = \frac{p}{q}$; il valore di p si ricava dalla formula dei punti coniugati (§ 49 - 3), risolvendola rispetto a p:

$$p = \frac{q\,f}{q - f}.$$

Sostituendo nella precedente si ha:

$$\frac{l_2}{l_1} = \frac{q - f}{f},$$

e sostituendovi i dati del problema si ottiene:

$$\frac{400}{7} = \frac{q - 15}{15}; \quad \text{da cui:} \quad q = \text{cm.}\left(\frac{6000}{7} + 15\right) = \textbf{m. 8,72.}$$

70. **Microscopio semplice.** — I **microscopi** servono per ottenere immagini ingrandite di piccoli oggetti, direttamente nell'occhio.

Il **microscopio semplice o lente d'ingrandimento** (di cui la prima costruzione si attribuisce a Bacone, sei secoli fa), è formato da una lente convergente O di piccola distanza focale, (Fig. 150). L'oggetto AB che si vuol guardare, è posto tra il fuoco e la lente; se ne ottiene allora un'immagine A_1B_1 diritta, ingrandita, virtuale (§ 51 - 5), che cioè si può osservare solo guardando con l'occhio, posto in C. Questo microscopio è solo adatto per ingrandimenti non troppo forti: la

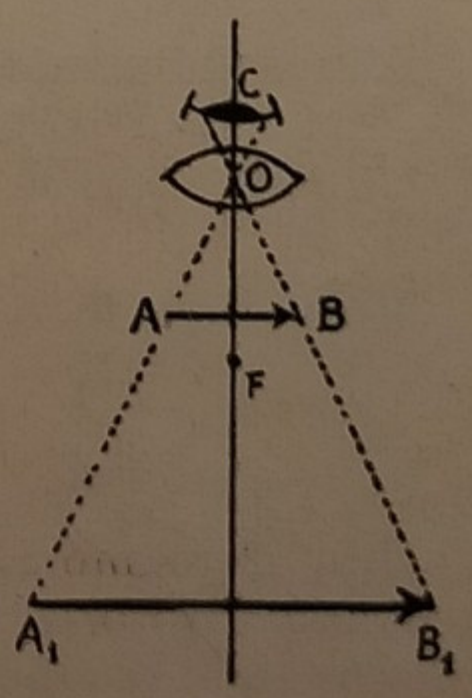


Fig. 150.

Fig. 151 ne mostra l'applicazione all'osservazione di un insetto; ma altre applicazioni comuni sono quelle dei *diorama*, del *contafili* (Fig. 152) per

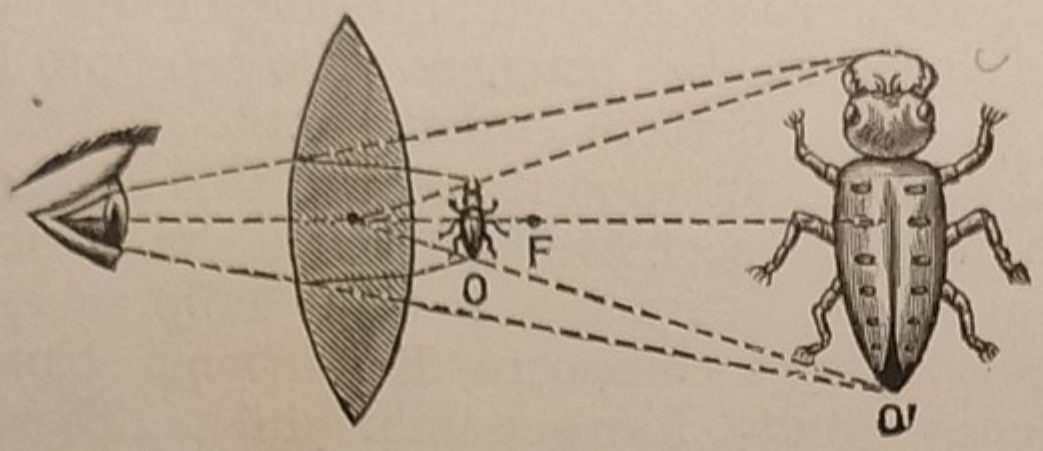


Fig. 151.

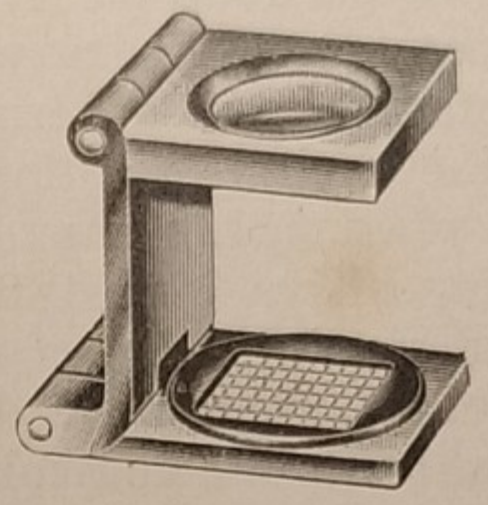


Fig. 152.

contare i fili dei tessuti contenuti in una data larghezza, delle vedute di immagini religiose o simili contenute in piccoli oggetti per ricordo, della lente dell'orologiaio, ecc.

71. **Microscopio composto.** — Per ingrandimenti maggiori bisogna ricorrere al **microscopio composto**, scoperto da Zaccaria Jansen attorno al 1580. Esso è formato da una lente convergente O di piccola distanza focale, chiamata l'**obiettivo**, (Fig. 153). Tra il fuoco F di essa e la doppia distanza focale, si pone l'oggetto AB di cui si vuole l'immagine ingrandita; se ne forma un'immagine A_1B_1 reale, capovolta, ingrandita, oltre il doppio della distanza focale, dall'altra parte della lente, (§ 51 - 3). A_1B_1 a sua volta funziona da oggetto rispetto ad una seconda lente convergente O_1 detta **oculare**; essa cade tra il fuoco F_1 e la lente, che ne forma perciò una nuova immagine A_2B_2 virtuale, nuovamente ingrandita, dalla stessa parte di A_1B_1, diritta rispetto ad A_1B_1 e quindi capovolta rispetto all'oggetto AB; essa è l'immagine che si voleva ottenere e che si osserva direttamente con l'occhio posto sopra l'oculare.

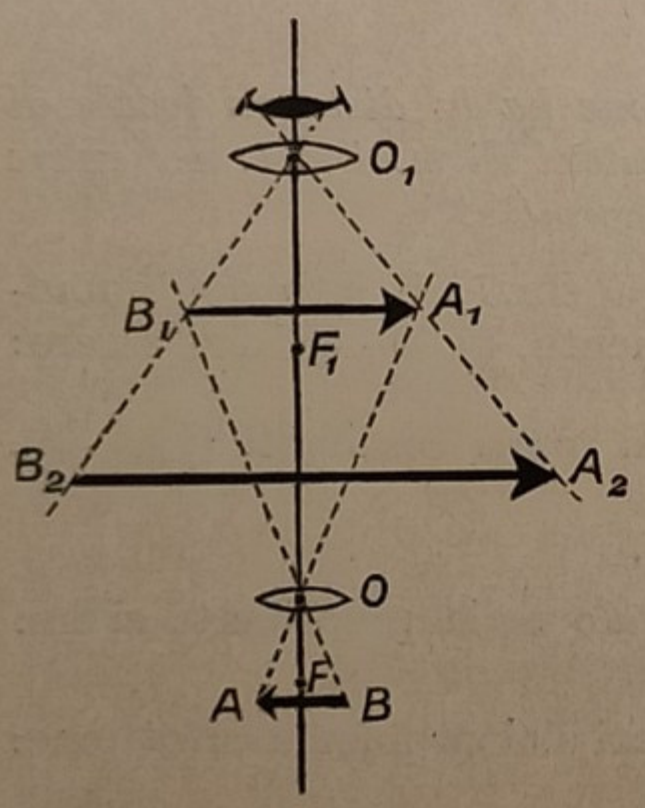


Fig. 153.

L'ingrandimento dell'apparecchio è il rapporto:

$$G = \frac{A_2 B_2}{AB}.$$

Moltiplicando e dividendo per A_1B_1, si ha:

$$G = \frac{A_2 B_2}{A_1 B_1} \times \frac{A_1 B_1}{AB}.$$

Ora, il primo rapporto misura l'ingrandimento dell'oculare (§ 52), e il secondo rapporto parimenti dà l'ingrandimento dell'obiettivo; quindi nel microscopio composto: *L'ingrandimento è il prodotto* (e non la somma) *dell'ingrandimento dell'oculare per quello dell'obiettivo.*

La Fig. 154 mostra come è costruito in pratica l'apparecchio: l'obiettivo O e l'oculare O' sono posti alle estremità di un tubo T di ottone, allungabile. Non sono lenti semplici; l'obiettivo è ordinariamente formato da più lenti biconvesse, di piccola distanza focale, sovrapposte una all'altra; il tutto è equivalente ad una sola lente convergente, della distanza focale di pochi millimetri. L'oculare è solitamente formato da due lenti pianoconvesse, e s'infila semplicemente all'estremità superiore del tubo T.

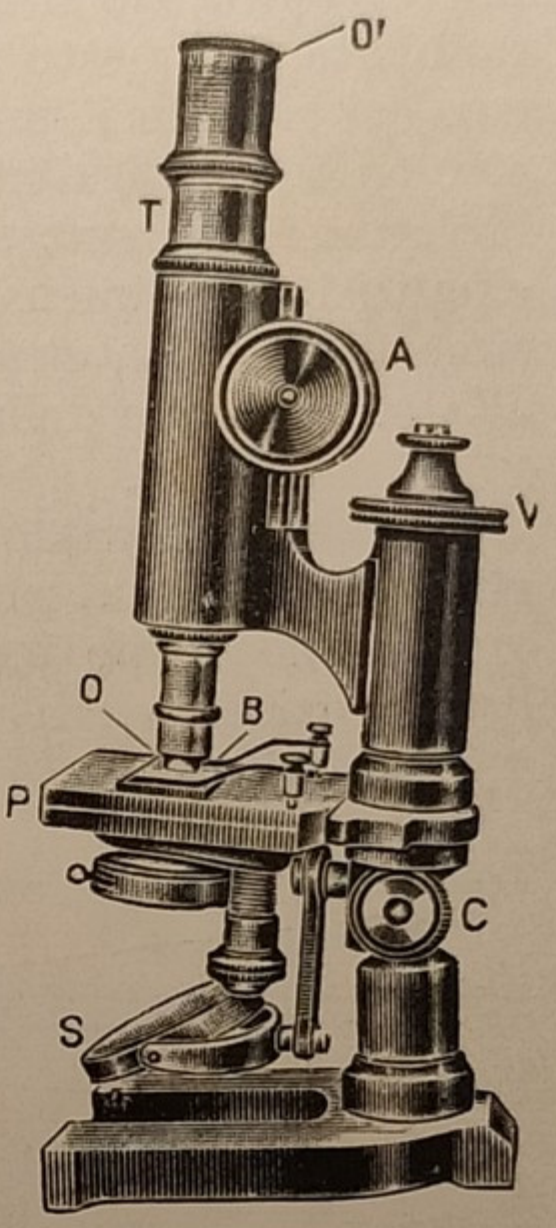


Fig. 154.

L'oggetto B è un sottile frammento di piccole dimensioni, posto fra due vetri: l'inferiore, più spesso, serve da sostegno, e si chiama il *portaoggetto*; il superiore è sottilissimo, e si chiama *coprioggetto*; i due vetri sono incollati con balsamo del Canadà, che fa da mastice trasparente, in cui è annegato l'oggetto; questo così è preservato dall'umidità e dall'aria e si conserva inalterato.

Il portaoggetto è sostenuto da una piattaforma di metallo P, forata in mezzo. Per questo foro passano i raggi luminosi provenienti da una finestra o da una lampada ordinaria, e che battendo su uno specchio concavo S, vengono concentrati sull'oggetto B, che così viene fortemente illuminato. La posizione giusta dell'oggetto rispetto all'obiettivo, si ottiene alzando o abbassando tutto il tubo $O'O$, dapprima rapidamente con la cremagliera A, poi con la vite micrometrica V, che produce spostamenti di piccola frazione di millimetro.

Obiettivo ed oculare sono cambiabili, per ottenere ingrandimenti diversi. La teoria dice che, per la conformazione del nostro occhio, non si può sorpassare un ingrandimento da 3500 a 4000 volte, a secondo del colore della luce con cui si illumina l'oggetto; in pratica si è riusciti ad ottenere ingrandimenti di circa 3000 diametri. Per questi maggiori ingrandimenti occorre l'**obiettivo ad immersione**; cioè fra il vetro coprioggetto e la prima lente dell'obiettivo, vicinissima, è posta una goccia d'acqua o meglio di *olio di cedro*, che ha lo stesso indice di rifrazione del vetro; così non avvengono brusche deviazioni dei raggi luminosi nel passaggio dal vetro coprioggetto all'aria e da questa al vetro dell'obiettivo, e si ottengono immagini più nitide. Tutto l'apparecchio può ruotare intorno ad una cerniera C, in modo da dare al tubo T l'inclinazione più adatta per osservare l'immagine stando seduti.

Il microscopio è stato la sorgente di importanti scoperte in botanica, in zoologia, in fisiologia. Ad esso è dovuta la conoscenza di microrganismi prima ignorati, esistenti nell'aceto, nella pasta, nelle frutta secche, nel latte, nell'acqua, ecc. Esso offre anche numerose applicazioni nell'industria, e permette di riconoscere le adulterazioni e le sofisticazioni degli alimenti, la presenza del cotone, della lana, della seta, nelle stoffe, ecc. Oggi poi è di incalcolabile aiuto alla medicina, per l'esame dei micróbi patogeni, causa di molte malattie.

Di recente si è riusciti a scorgere col microscopio corpuscoli delle dimensioni di 3 a 5 millesimi di micron [1], mediante il dispositivo detto **ultramicroscopico**; ciò si ottiene illuminando l'oggetto non dal di sotto, ma lateralmente; in questo modo si vedranno i piccoli punti nella stessa maniera con cui si vede il pulviscolo dell'aria e le stelle sul fondo oscuro del cielo cioè come punti luminosi distinti in campo oscuro, senza però distinguerne la forma. Ciò nonostante l'osservazione di questi piccolissimi corpi, avvicinantisi alle dimensioni delle molecole, ha fornito un mezzo importantissimo d'indagine, che ha permesso di risolvere parecchie questioni inerenti alla costituzione della materia.

72. **Cannocchiale astronomico.** — I **cannocchiali** servono a mostrare gli oggetti lontani più grandi e più chiari che ad occhio nudo.

Il **cannocchiale astronomico,** inventato da Keplero nel 1611, serve per l'osservazione degli astri. Esso è formato da una lente convergente O

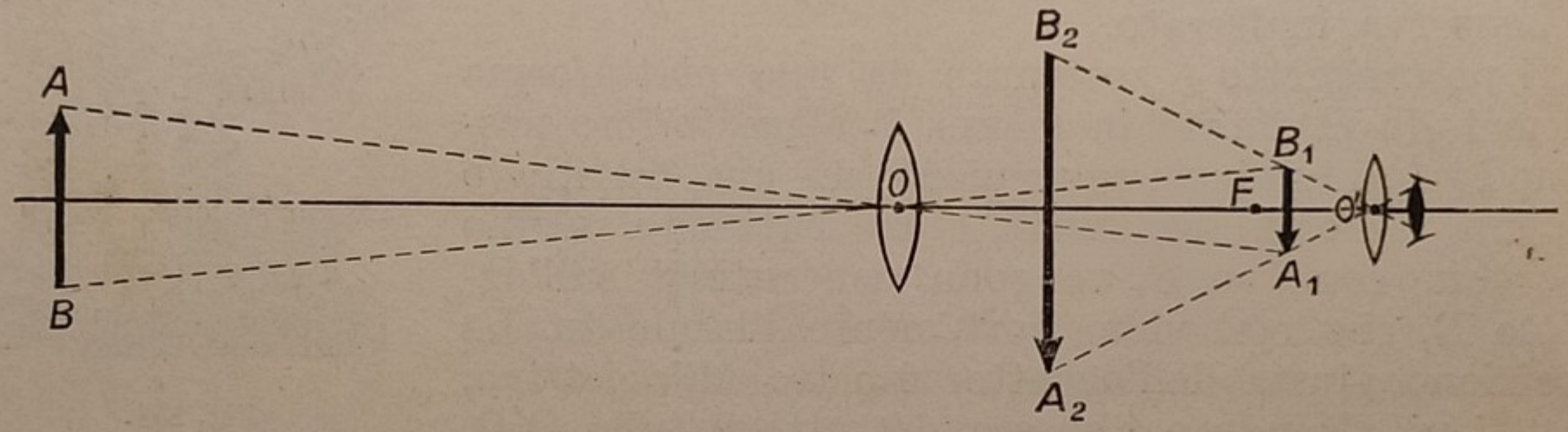


Fig. 155.

(Fig. 155), chiamata l'**obiettivo,** rispetto a cui l'oggetto AB da guardare è praticamente all'infinito: se ne forma quindi un'immagine A_1B_1 reale, capovolta, impiccolita, quasi sul fuoco F. Questa funziona da oggetto rispetto ad un'altra lente O' pure convergente, chiamata l'**oculare,** il cui fuoco è ancora all'incirca in F; A_1B_1 si trova rispetto all'oculare tra il fuoco e la lente; l'oculare funziona allora come un microscopio semplice e fornisce un'altra immagine A_2B_2 virtuale, ingrandita, dalla stessa parte di A_1B_1, diritta rispetto ad A_1B_1 e quindi *capovolta rispetto all'oggetto osservato.* Questo cannocchiale perciò, formando immagini capovolte, non è adatto per l'osservazione di oggetti terrestri.

L'**ingrandimento** nel cannocchiale non può più definirsi il rapporto tra la grandezza dell'immagine e quella dell'oggetto; infatti diremo che un cannocchiale ingrandisce, non quando l'immagine è più grande dell'oggetto reale, il che non avverrà mai; ma quando l'immagine osservata con lo strumento è più grande di quella vista ad occhio nudo; cioè:

L'ingrandimento è il rapporto tra la grandezza apparente dell'immagine e la grandezza apparente dell'oggetto.

Ora la grandezza apparente dell'immagine è misurata dall'angolo, $A_2O'B_2 = A_1O'B_1$ (§ 64); per la grandezza apparente dell'oggetto, data la sua enorme distanza, si può considerare l'occhio posto in O anzichè in O';

---

(1) Un *micron* = 0,001 mm. (Vol. 1° - § 23).

essa è quindi misurata dall'angolo $AOB = A_1OB_1$; l'ingrandimento pertanto è:

$$G = \frac{\widehat{A_1O'B_1}}{\widehat{A_1OB_1}}.$$

Ora, considerando questi due angoli così piccoli che la corda A_1B_1 coincida con l'arco che la sottende, su cerchi di centro O ed O' e di raggio OF ed $O'F$ [1], e che, com'è noto dalla *Geometria*, la misura di un arco è eguale al prodotto del raggio per l'angolo al centro (*in radianti*) che insiste su di esso, avremo:

$A_1B_1 = OF \times \widehat{A_1OB_1} = O'F \times \widehat{A_1O'B_1}$; cioè: $\frac{\widehat{A_1O'B_1}}{\widehat{A_1OB_1}} = \frac{OF}{O'F}$, ossia:

1) $$G = \frac{OF}{O'F};$$ quindi nel cannocchiale:

L'ingrandimento è eguale al rapporto tra la distanza focale dell'obiettivo e quella dell'oculare.

Conviene perciò che l'obiettivo sia poco convergente e l'oculare invece assai convergente.

La **lunghezza del cannocchiale** è la distanza OO' tra le due lenti; è evidentemente:

2) $$OO' = OF + O'F;$$ cioè:

La lunghezza del cannocchiale astronomico è la somma delle distanze focali dell'obiettivo e dell'oculare.

Problema. — *Si vuole un ingrandimento di 50 volte, con un cannocchiale astronomico lungo cm.80. Quale dev'essere la distanza focale delle due lenti?*

Soluzione. — Sia x la distanza focale dell'obiettivo ed y quella dell'oculare; è per la 1): $x : y = 50$, e per la 2): $x + y = 80$. Risolvendo questo sistema si ha:

$$x = \text{cm. } 78{,}4 \qquad y = \text{mm. } 15{,}7.$$

73. **I grandi cannocchiali.** — Nella pratica le lenti sono alle estremità di tubi, in parti rientranti: l'obiettivo è una lente acromatica (§ 56), per avere immagini esenti da colorazioni; l'oculare è come quello del microscopio, formato cioè da due lenti piano-convesse.

Parrebbe, aumentando a piacere la convergenza dell'oculare, che con lo stesso obiettivo si possa ottenere un ingrandimento tanto forte quanto si vuole. Così non è in realtà; aumentando l'ingrandimento diminuisce la luminosità (chiamata meglio la *chiarezza*, § 83) dell'immagine. D'altra parte la chiarezza nel cannocchiale è maggiore che con la visione ad occhio nudo. Infatti guardando un punto luminoso direttamente con l'occhio, la sua immagine è formata da tutti quei raggi contenuti nel cono che ha per vertice il punto luminoso e per base la pupilla; guardando lo stesso punto col cannocchiale, l'immagine nell'occhio è dovuta a tutti i raggi contenuti nel cono che ha per vertice lo stesso punto luminoso e per circonferenza base il contorno dell'obiettivo del cannocchiale, assai maggiore della pupilla.

(1) Si ricordi che F è sensibilmente su A_1B_1.

Ora, per norma, nel cannocchiale l'ingrandimento non dovrà sorpassare quel limite per cui l'immagine risulti meno chiara che ad occhio nudo. Quindi l'aumento dell'ingrandimento deve essere accompagnato dall'aumento del diametro dell'obiettivo; in pratica, cioè, l'ingrandimento di un cannocchiale dipende dalla possibilità di costruire lenti di grandi dimensioni.

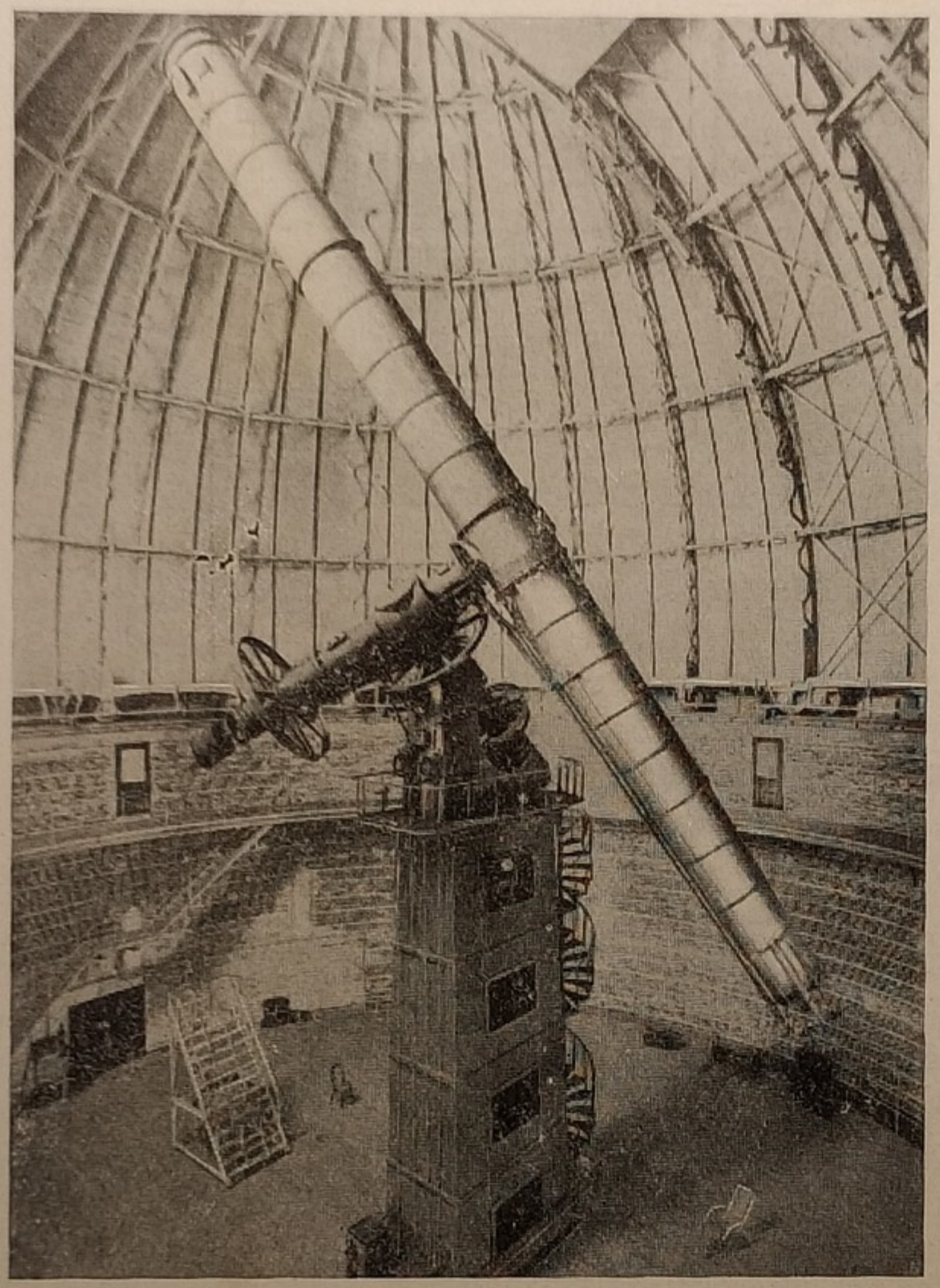


Fig. 156.

L'obiettivo più grande fin'ora costruito, è quello dell'Osservatorio di Yerkes, presso Chicago, del diametro di cm. 102; la lunghezza di tutto il cannocchiale è di m. 19 e permette un ingrandimento di 3000 volte.

Questi enormi cannocchiali sono sostenuti da opportuni supporti, entro cupole girevoli, e sono comandati da motori elettrici, che ne permettono lo spostamento in qualunque direzione.

La Fig. 156 rappresenta uno di questi grandi **equatoriali**, e precisamente quello dell'Osservatorio di Yerkes.

Quando però si tratta di osservazione di stelle, l'ingrandimento non ha alcuna importanza. Una stella è praticamente un punto; per quanto forte sia l'ingrandimento, l'immagine di un punto è sempre un punto: una stella, coi più forti cannocchiali, si vede, per la forma, come ad occhio nudo.

Ciò che si guadagna col cannocchiale è la luminosità, per cui si vedono delle stelle invisibili ad occhio nudo. Le stelle visibili ad occhio nudo sono appena qualche migliaio; mentre quelle visibili coi grandi cannocchiali sono centinaia di milioni [1]. Aggiungiamo che guardando il cielo con tali cannocchiali, mentre le stelle acquistano in luminosità, viceversa il fondo del cielo, per l'ingrandimento, appare più oscuro; e allora si vedranno le stelle anche di giorno.

---

(1) Le stelle rilevate con la fotografia fin'ora sono più di un miliardo e mezzo.

74. **Cannocchiale terrestre.** — Per osservare gli oggetti sulla terra, è necessario ottenerne immagini diritte. Si aggiungono per ciò all'oculare del cannocchiale astronomico altre lenti, allo scopo appunto di raddrizzare l'immagine. Una disposizione semplice è rappresentata dalla Fig. 157; O è l'obiettivo, che anche ora dell'oggetto AB fornisce una prima immagine A_1B_1 reale, capovolta, impiccolita; essa si forma al doppio della distanza focale di una lente convergente L, che forma una nuova immagine A_2B_2, di eguale

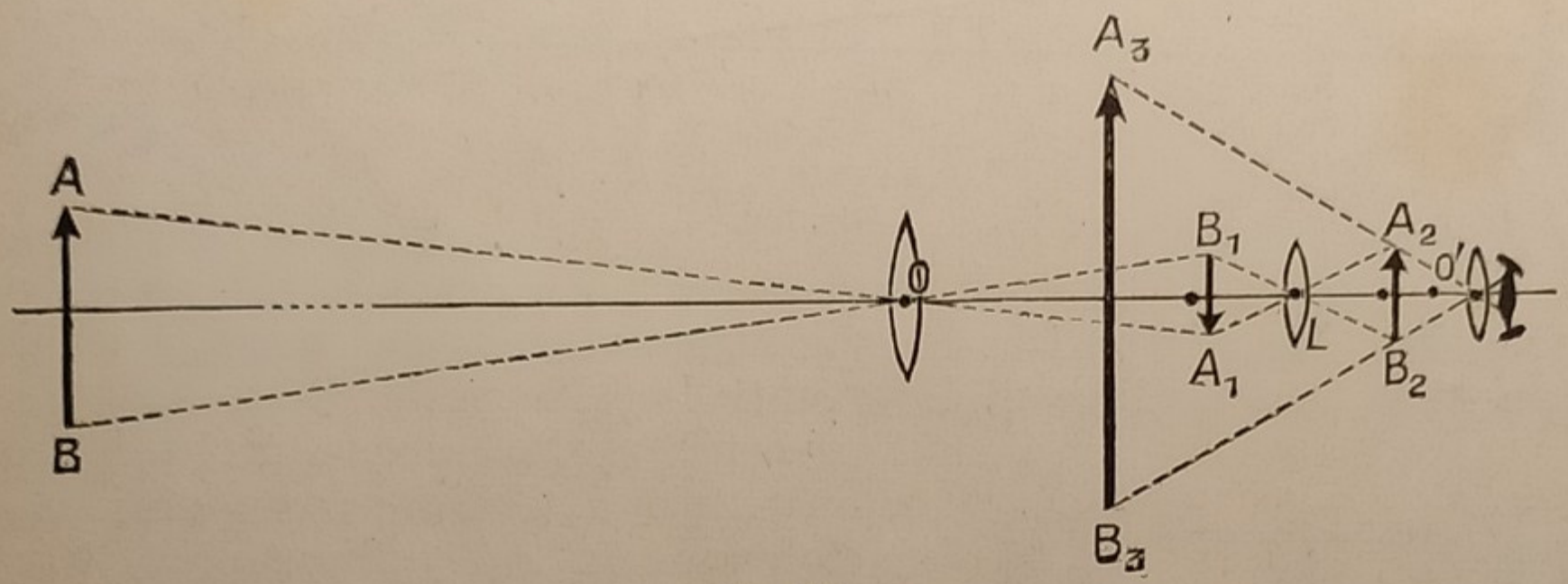


Fig. 157.

grandezza che A_1B_1, ma *raddrizzata* (§ 51 - 2); A_2B_2 cade tra il fuoco e l'oculare O' che, al solito, ne forma una immagine A_3B_3 virtuale, ingrandita, *diritta* rispetto ad A_2B_2 e quindi anche rispetto all'oggetto AB.

In pratica L è formata da due lenti convergenti vicine ed eguali; A_1B_1 è nel piano focale della prima ed A_2B_2 si forma nel piano focale della seconda.

Fig. 158.

Il cannocchiale risulta più lungo di quello astronomico della distanza tra A_1B_1 e A_2B_2; inoltre siccome ogni lente aggiunta produce necessariamente diminuzione di chiarezza, a parità di dimensioni dell'obiettivo nel cannocchiale terrestre si può raggiungere un ingrandimento di circa la metà che nell'astronomico.

Tutto il cannocchiale è formato da più parti rientranti una nell'altra, in modo che chiuso occupi poco posto, e sia facilmente trasportabile. La Fig. 158 rappresenta il cannocchiale già allungato.

75. **Cannocchiale di Galileo.** — Galileo [1], che per il primo in Italia inventò il cannocchiale (nel 1609), ottenne l'ingrandimento ed il raddrizzamento dell'immagine con due sole lenti, con la disposizione seguente:

L'obiettivo O (Fig. 159) è ancora una lente convergente, che dell'oggetto lontano AB formerebbe una immagine A_1B_1, vicino al fuoco F, al solito reale, capovolta, impiccolita. Ma in realtà quest'immagine non si forma,

---

(1) Galileo Galilei, sommo scienziato, matematico e filosofo; n. a Pisa il 18 febbraio 1564; m. ad Arcetri l'8 gennaio 1642.

perchè prima di essa è posto l'oculare O', che è una lente *divergente*, il cui fuoco è ancora all'incirca in F; cioè di distanza focale minore di quella

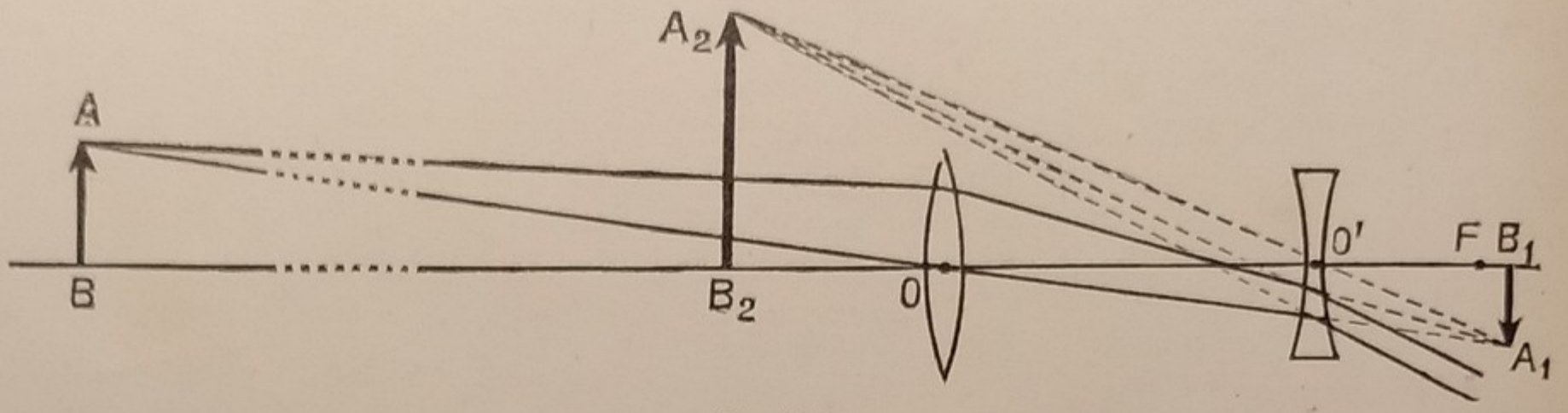


Fig. 159.

dell'obiettivo. Essa impedisce la convergenza in A_1 dei raggi provenienti da A; anzi fa uscire tali raggi divergenti; l'occhio posto dietro l'oculare riceve tali raggi, come se provenissero da un punto A_2 dell'asse secondario A_1O'; cioè vede in A_2B_2 l'immagine virtuale, *diritta*, ingrandita.

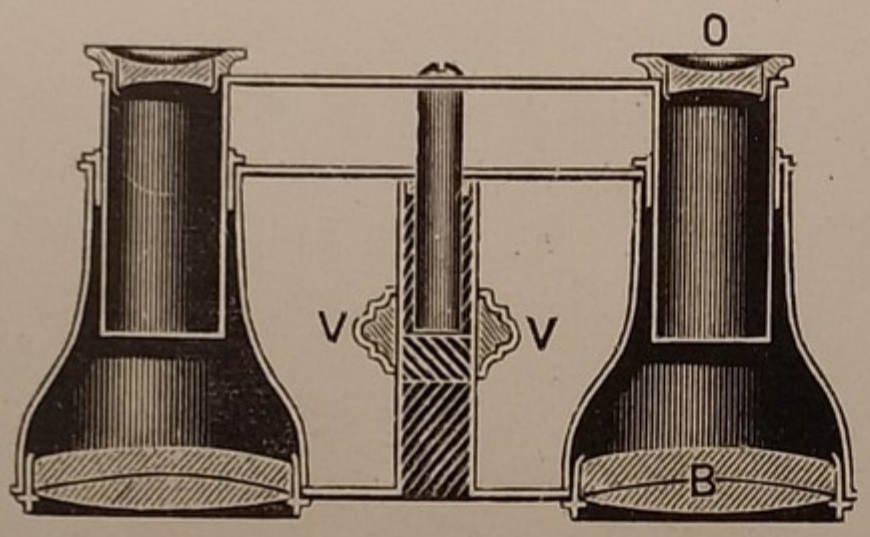


Fig. 160.

La lunghezza OO' del cannocchiale è ora: $OO' = OF - O'F$; cioè la differenza tra la distanza focale dell'obiettivo e quella dell'oculare. Il cannocchiale riesce quindi assai corto, e può adattarsi per farne un binoccolo; infatti il **binoccolo da teatro** (Fig. 160) è formato dall'unione di due cannocchiali di Galileo.

La lente divergente però sparpaglia troppo i raggi; l'immagine cioè perde notevolmente in chiarezza: onde con questo cannocchiale non si possono ottenere forti ingrandimenti.

76. **Cannocchiale prismatico.** — Da qualche anno ha avuto molta diffusione un cannocchiale, nel quale il raddrizzamento dell'immagine si ottiene con prismi, anzichè con lenti; perciò si chiama il **cannocchiale prismatico.** Esso è stato ideato dall'italiano Porro nel 1850; ma è stato praticamente diffuso dalla Casa Zeiss di Jena.

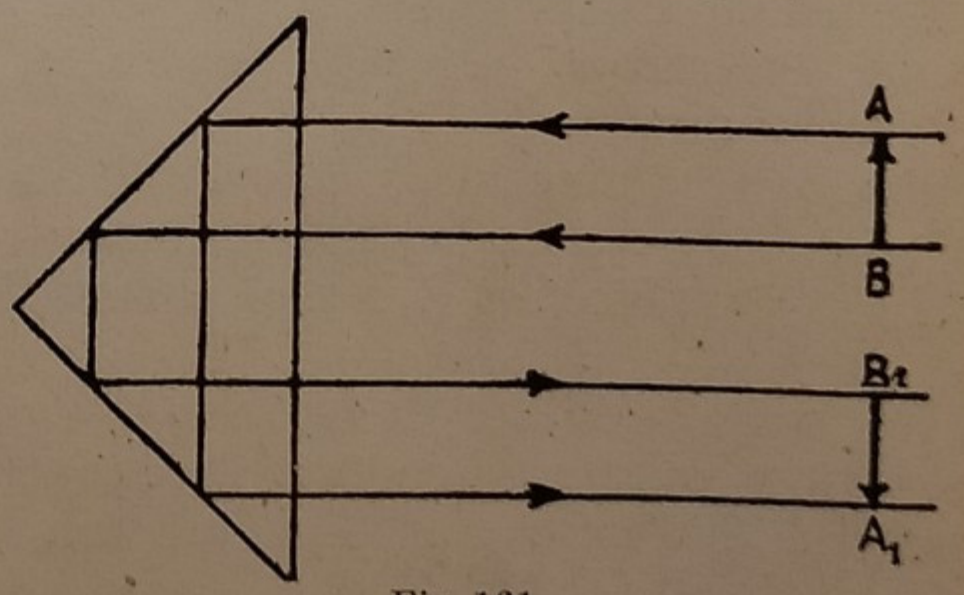


Fig. 161.

Per comprendere il funzionamento di questo cannocchiale, ricordiamo (§ 35) che se un raggio di luce colpisce normalmente l'ipotenusa della sezione normale di un prisma a riflessione totale, esso dopo due riflessioni sui cateti, ritorna indietro parallelamente a sè stesso. La Fig. 161 mostra inoltre chiaramente come per questa doppia riflessione si ottiene un capovolgimento nell'andamento dei raggi nel piano del foglio; ma non in un piano a questo perpendicolare: cioè un tal prisma è capace di rad-

drizzare un'immagine in una direzione sola, p. es. in altezza, ma non in larghezza, o viceversa.

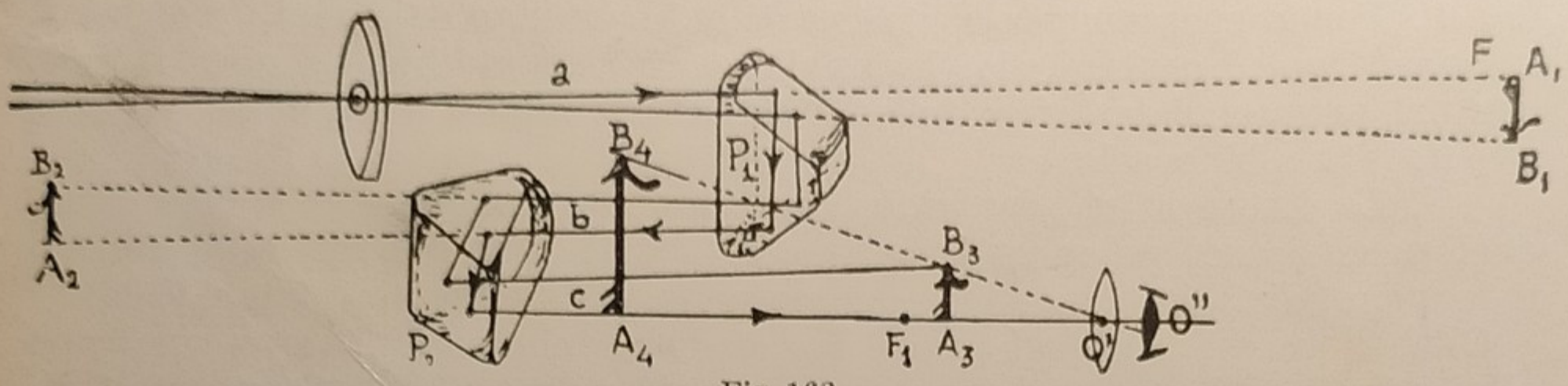


Fig. 162.

Ciò posto, sia O (Fig. 162) un obiettivo convergente solito come quello degli altri cannocchiali; esso formerebbe una immagine A_1B_1 reale, impiccolita, *capovolta*, vicino al suo fuoco F. Ma quest'immagine non si forma, perchè tra O ed F, a circa $\frac{1}{3}$ di OF, è collocato un prisma a riflessione totale P_1, per il quale l'immagine anzichè in A_1B_1 si formerebbe in A_2B_2, eguale ad A_1B_1 ma *raddrizzata nel senso dell'altezza*. Neanche quest'immagine si forma, perchè prima i raggi sono nuovamente riflessi da un secondo prisma P_2, i cui spigoli laterali sono ortogonali con quelli di P_1 (la Fig. 162 mostra i due prismi in prospettiva; in essa si deve intendere

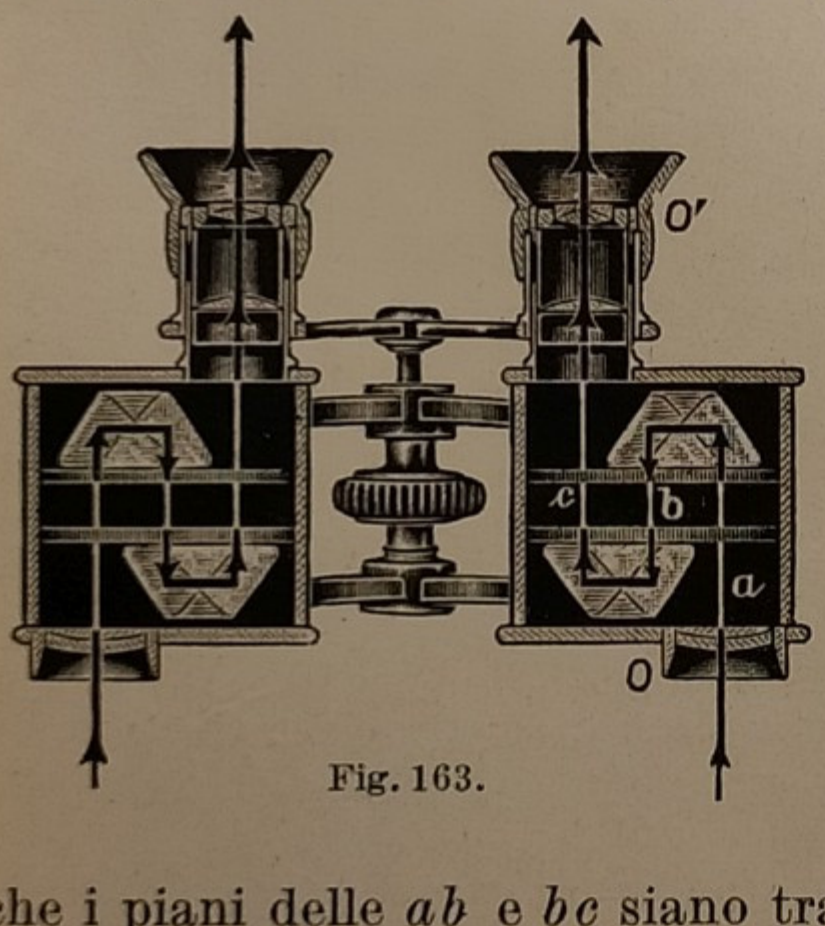


Fig. 163.

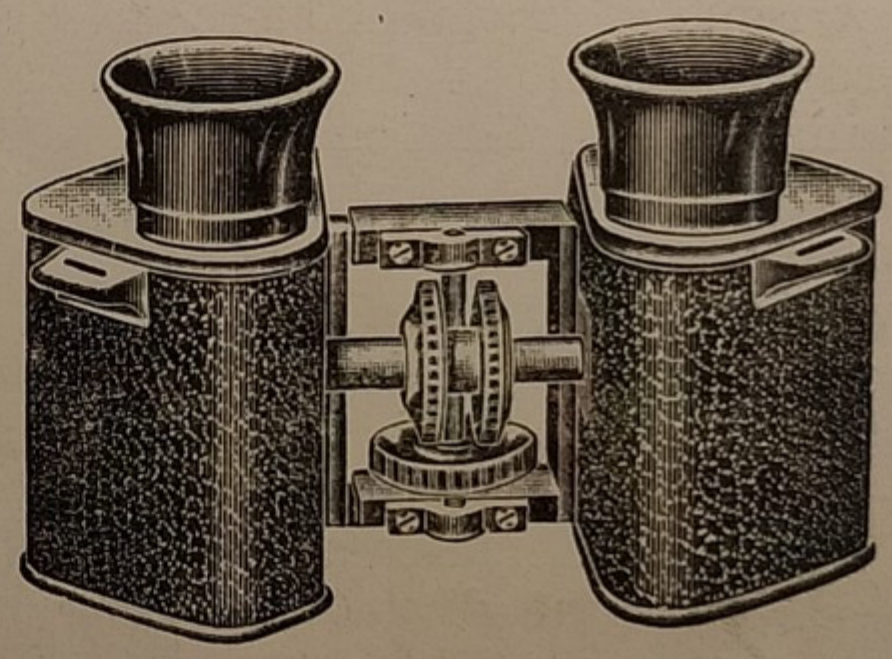


Fig. 164.

che i piani delle ab e bc siano tra loro perpendicolari); per causa di questo secondo prisma l'immagine si forma definitivamente in A_3B_3, ed è da P_2 *raddrizzata nel senso della larghezza*; quindi dai due prismi l'immagine viene raddrizzata in tutti i sensi. A_3B_3 cade tra il fuoco F_1 e l'oculare O', da cui viene fornita al solito l'immagine virtuale A_4B_4 ingrandita, che è quella osservata con l'occhio O''.

La Fig. 163 mostra la sezione dello strumento ed il cammino dei raggi tra l'obiettivo O e l'oculare O'; si deve intendere anche ora che il piano dei raggi (ab), sia perpendicolare a quello dei raggi (bc). La Fig. 164 mostra la forma pratica dello strumento.

I vantaggi di questo cannocchiale sono parecchi ed importanti:

1. Il raddrizzamento dell'immagine essendo ottenuto senza intervento di lenti, non si ha sensibile perdita di chiarezza e di nitidezza; onde a parità

di obiettivo, si possono ottenere maggiori ingrandimenti come per il cannocchiale astronomico, a cui esso è equivalente.

2. Per lo spezzamento in tre parti del cammino dei raggi, la distanza tra obiettivo ed oculare, cioè la lunghezza del cannocchiale, è circa il terzo che nel cannocchiale astronomico. Esso riesce quindi assai corto, e se ne può fare un binoccolo.

3. La distanza fra i centri dei due obiettivi, è maggiore che fra i centri degli oculari; cioè gli oggetti vengono osservati come se i due occhi fossero a maggior distanza, e quindi con percezione di maggior rilievo (§ 66).

Oltre a questi vantaggi propri del sistema dello strumento, ve ne sono altri dovuti alla cura con cui esso è costruito: gli oculari possono mettersi a fuoco uno indipendentemente dall'altro, anzichè entrambi insieme come nel binoccolo da teatro; ciò per il caso assai frequente di ineguaglianza di convergenza fra i due occhi della stessa persona; vi è una disposizione per cui si può spostare la distanza fra i centri dei due oculari, per renderla eguale alla distanza fra i centri delle due pupille, variabile da persona a persona; ciò per rendere esatta la sovrapposizione dei due campi visivi dei due occhi. Questi, ed altri vantaggi minori, rendono lo strumento assai utile, e dànno la ragione della sua rapida, grande diffusione.

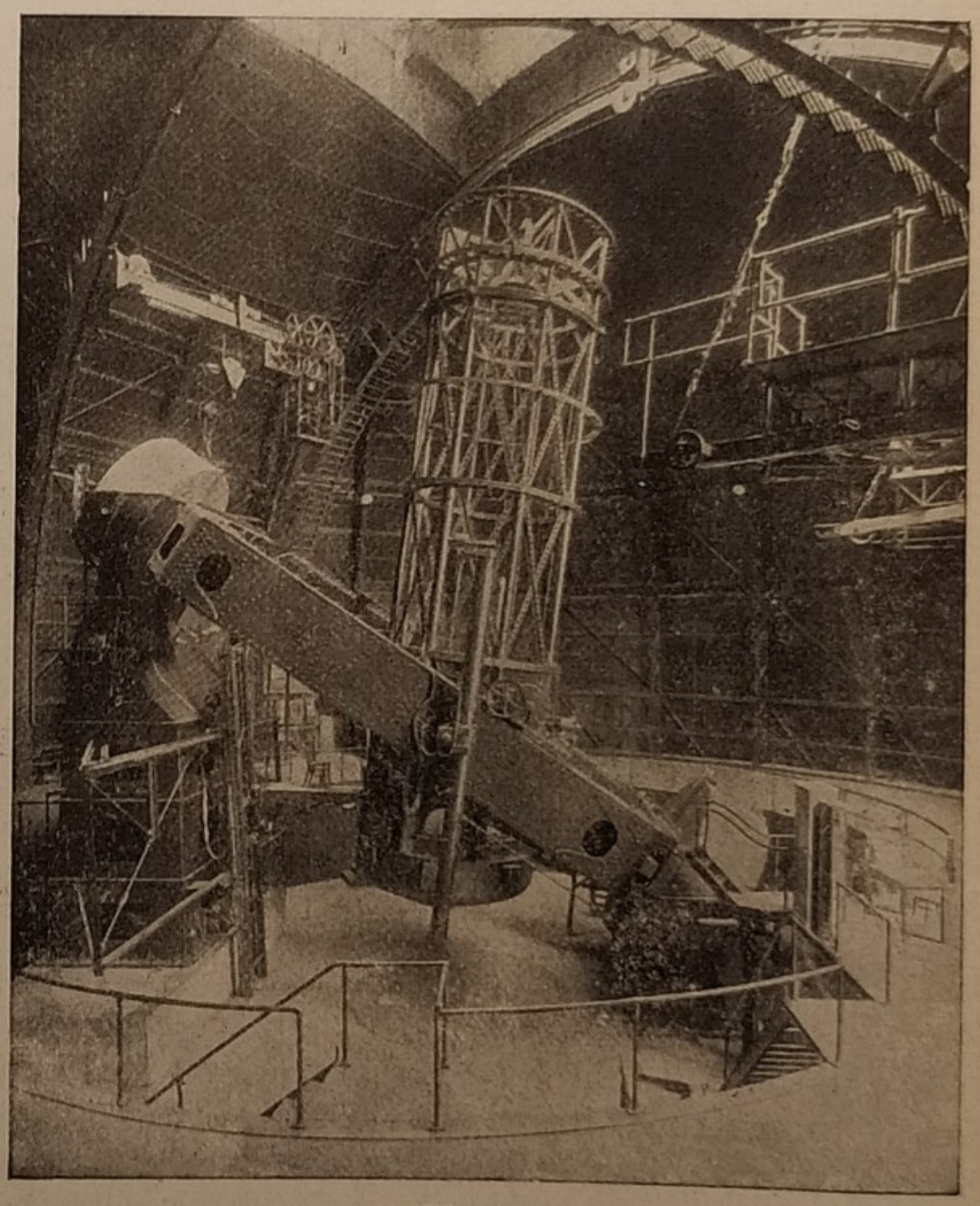


Fig. 165.

77. **Cenno dei telescopi.** — L'immagine di un oggetto lontano, anzichè con una lente convergente, può ottenersi con uno specchio concavo. L'apparecchio in questo caso si chiama **telescopio**; se ne sono costruite parecchie forme, che non descriviamo, perchè oramai fuori d'uso. Esse differivano una dall'altra, specialmente per il modo con cui si disponeva l'oculare; dovendo infatti osservare l'immagine per riflessione, si deve evitare di collocare la testa nel cammino dei raggi, fra lo specchio e l'oggetto.

I telescopi avevano il difetto di richiedere uno specchio la cui argentatura rapidamente si oscurava e si appannava. Onde, allorchè si trovò il modo di costruire lenti di grandi dimensioni, il cannocchiale sostituì quasi del tutto il telescopio.

Oggi si ritorna ad adoperarli, perchè è più facile e meno costoso costruire uno specchio di grande diametro, anzichè una lente acromatica. Inoltre il vetro della lente assorbe molti dei raggi attivi per la fotografia e perciò si richiede maggior tempo per impressionare la lastra fotografica, nel caso in cui si adopera il cannocchiale per la fotografia delle stelle anzichè per l'osservazione diretta; tale assorbimento è evitato con lo specchio.

La Fig. 165 mostra il telescopio Hooker, dell'Osservatorio astronomico del monte Wilson, in California. Il suo specchio ha il diametro di m. 2,50, è spesso 30 cm. e pesa circa kg. 4500; la Fig. 166 lo mostra prima del mon-

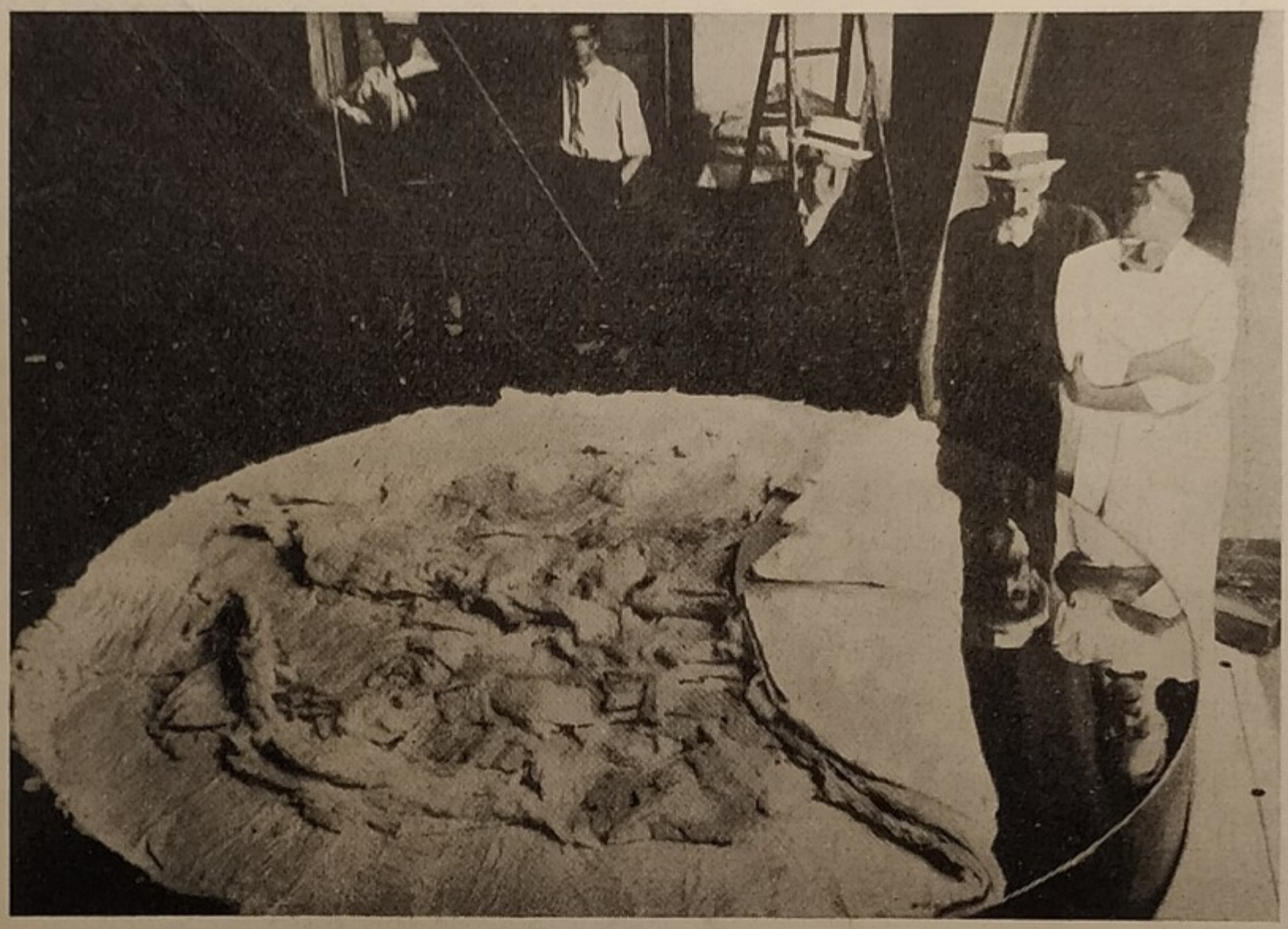


Fig. 166.

taggio, ancora coperto d'ovatta, tranne che nella parte di destra, ove riflette l'immagine delle persone. Quello di Hooker è fin'ora il più grande telescopio del mondo. Se ne sta costruendo un altro a Pasadena, per lo stesso Osservatorio, con specchio di m. 5 di diametro!

78. **Teodolite.** — Si chiama **angolo orizzontale** od anche **angolo azimutale** o semplicemente **azimut** di due punti B e C dello spazio, nel punto di osservazione A, la sezione normale del diedro formato da due piani verticali, la cui intersezione è la verticale passante per A e che passano rispettivamente per B e C.

Si chiama **distanza zenitale** di un punto B dello spazio da un punto di osservazione A, l'angolo che la visuale (§ 64) AB forma con la verticale passante per A. Si chiama **altezza zenitale** di B da A il complemento della distanza zenitale; cioè l'angolo che la visuale AB forma con il piano orizzontale che passa per A.

Dalla misura di tali angoli, la Trigonometria insegna a calcolare l'ampiezza dell'angolo $\widehat{BAC}$, che formano le due visuali AB ed AC.

Si chiama **Teodolite** lo strumento con cui si misurano gli azimut e le altezze zenitali; ne diamo una descrizione sommaria. Un cannocchiale C (Fig. 167) può ruotare intorno ad un asse orizzontale a-a'; al cannocchiale è fissato un cerchio graduato O il cui centro è sull'asse a-a' e il cui piano è verticale; l'angolo di cui ruota l'asse ottico del cannocchiale si misura su tale cerchio graduato, per mezzo di un *nonio* N (Vol. 1° - § 23), fissato sul sostegno del cannocchiale. Quest'ultimo porta una *livella* L (Vol. 1° - § 153), mediante la quale l'asse ottico del cannocchiale si può disporre orizzontalmente. Nel campo visivo del cannocchiale vi è un *reticolo*; cioè due fili sottilissimi (*fili di ragno*) perpendicolari; il loro punto d'intersezione è sull'asse ottico del cannocchiale, e serve a determinarne la direzione. Il sostegno S del cannocchiale può ruotare attorno ad un asse verticale b - b' per mezzo di un perno sostenuto da un trepiede fisso T, a viti calanti. Con tale sostegno è fissato un altro cerchio graduato O', il cui centro è sull'asse b - b' e il cui piano è orizzontale; l'angolo di cui ruota questo sostegno si misura sul cerchio graduato O', per mezzo di un nonio N' fissato sul trepiede T. Per mezzo di queste rotazioni si può dirigere l'asse ottico del cannocchiale in qualunque direzione dello spazio.

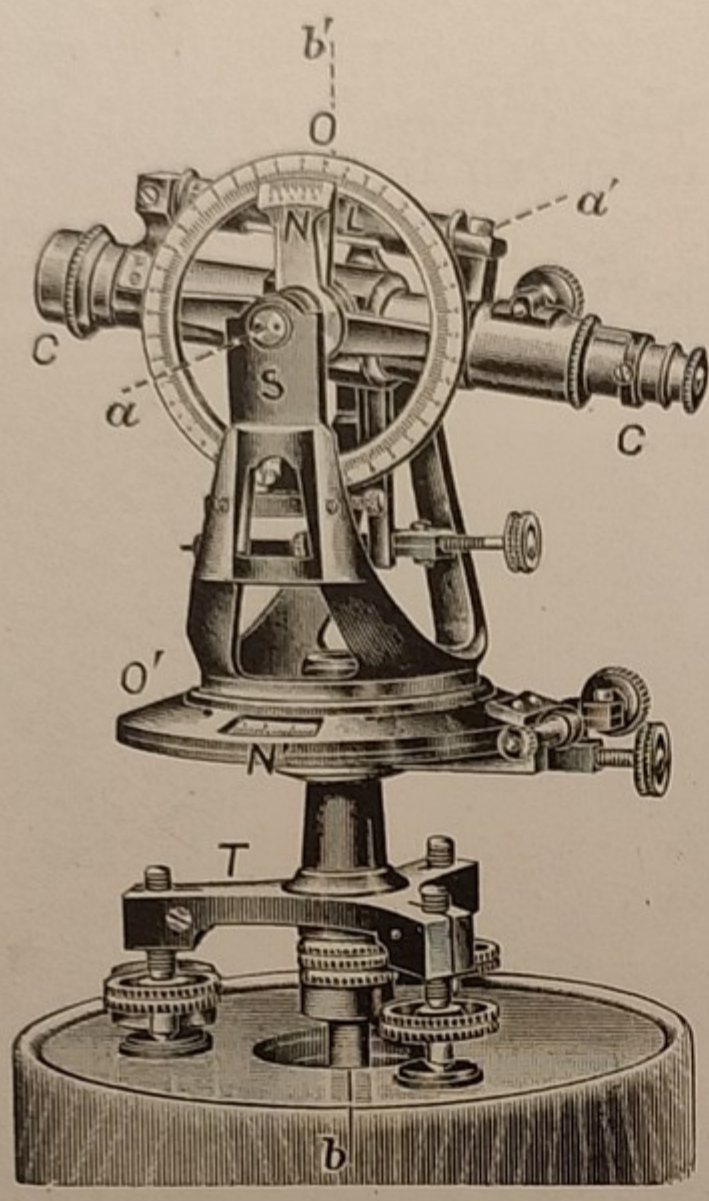


Fig. 167.

Per misurare l'*angolo azimutale* di due punti B e C, disposto l'apparecchio (per mezzo di livelle) in modo che l'asse b - b' sia verticale, ed a-a' orizzontale, si fa ruotare il cannocchiale attorno a tali assi, finchè l'immagine del punto B (nel cannocchiale) coincide col centro del reticolo; indi si legge sulla graduazione del cerchio O' la divisione α corrispondente allo zero del nonio. Poi si gira l'apparecchio finchè l'immagine di C coincide a sua volta col centro del reticolo; si legge sul cerchio O' la nuova divisione α' corrispondente allo zero del nonio. La differenza $\alpha - \alpha'$ dà l'azimut cercato.

Per misurare l'*altezza zenitale* di un punto B, si fa ruotare l'apparecchio finchè l'immagine di B coincide col centro del reticolo, e si legge sul cerchio graduato O la divisione β corrispondente allo zero del nonio. Indi si fa ruotare il cannocchiale, finchè il suo asse ottico è orizzontale; il che si osserva per mezzo della livella L; si legge sul cerchio graduato O la nuova divisione β' corrispondente allo zero del nonio, (in generale in tale posizione β' è lo zero della graduazione). La differenza $\beta - \beta'$ dà l'altezza zenitale cercata.

Nei migliori teodoliti odierni, la lettura del nonio si fa con microscopio; e con buona pratica si riesce a misurare gli angoli con l'approssimazione di $1''$.

79. **Cerchio azimutale.** — Allorchè si devono misurare soltanto gli angoli azimutali di punti dello spazio, è inutile l'uso del cerchio graduato O del teodolite; esso si può pertanto sopprimere e l'apparecchio rimane sem-

plificato e di minor costo. In tal caso esso si chiama *cerchio azimutale*, (Fig. 168); questi strumenti oggi sono poco adoperati, perchè si usa, in loro vece, il teodolite.

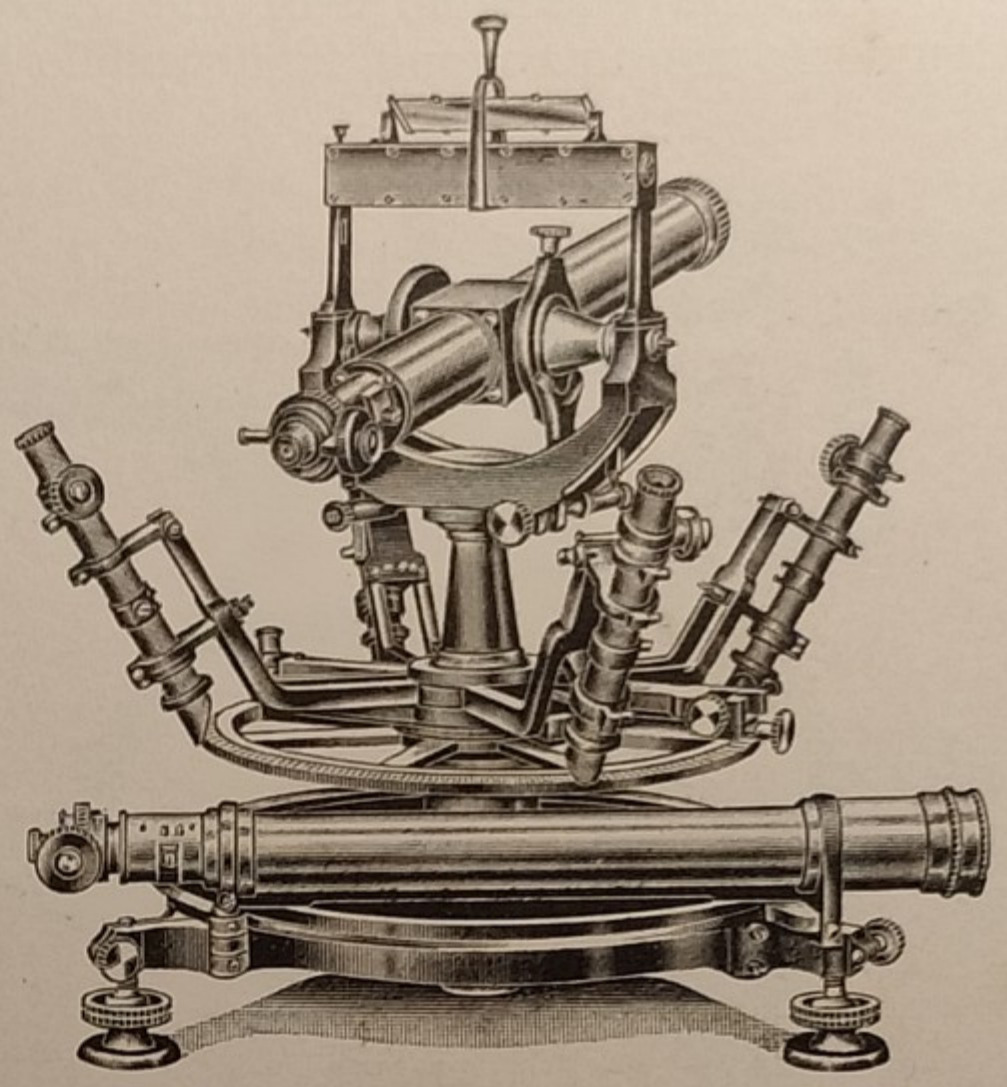


Fig. 168.

80. **Sestante.** — Allorchè si deve misurare l'angolo di due visuali AB ed AC (§ 78) serve benissimo il teodolite, purchè il suo sostegno sia fisso; cioè il teodolite possa disporsi su un trepiedi immobile. Nelle misure di più alta precisione, si sostituisce addirittura al trepiedi un pilastro di pietra ben fisso al suolo. Ciò manifestamente non può farsi allorchè la misura deve eseguirsi da un punto di osservazione mobile (ad es. su un bastimento), come occorre nella navigazione. In questo caso si raggiunge lo scopo facendo uso del *sestante*. Il principio dello strumento è il seguente.

Sia BI (Fig. 169) un raggio luminoso proveniente da un punto (lontano) B, incidente in I su uno specchio piano S; esso è riflesso su un altro specchio piano S_1, che a sua volta lo riflette nella direzione $I'A$. Un osservatore in A, vede B nella direzione AC. Si dimostra che: *l'angolo* $\widehat{BAC}$ *delle due visuali* AB *ed* AC *è doppio dell'angolo* $\alpha = \widehat{IOI'}$ *dei due specchi.*

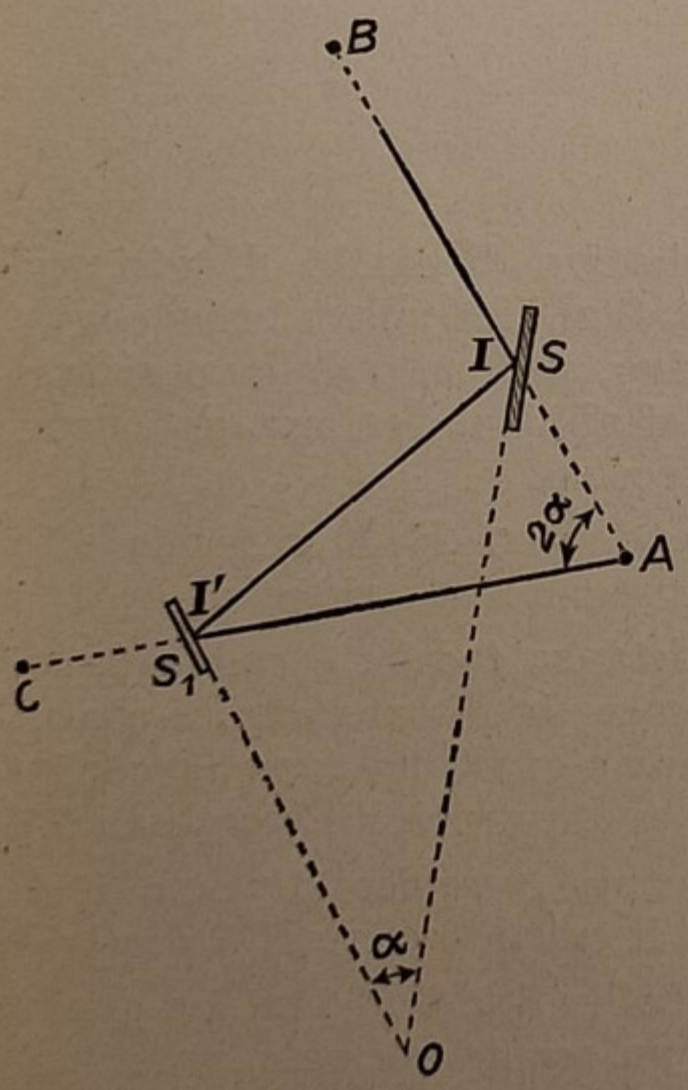


Fig. 169.

Il **sestante di Hadley** è appunto formato da un settore circolare di metallo (Fig. 170) il cui arco O-P è graduato; tale arco è di circa 65° (cioè circa $^1/_6$ di circonferenza, da cui il nome di *sestante*). Uno specchio piano S detto lo *specchio maggiore*, può ruotare attorno ad un asse (giacente nel piano di esso) passante per il centro del settore, e perpendicolare al piano di questo; quindi il piano di S è perpendicolare a quello del settore. La rotazione è ottenuta per mezzo di un'*alidada* MM a cui è fisso lo specchio, munita all'estremità di nonio N. Lateralmente al settore, è fissato su questo un altro specchio piano S_1, detto lo *specchio minore*, argentato solo nella metà più vicina al settore; il piano di S_1 è anch'esso perpendicolare al piano del settore, ed è parallelo al raggio del settore che passa per lo zero della graduazione dell'arco OP, che è all'estremità O; cioè allorchè lo zero del nonio N è sullo zero dell'arco graduato, i due specchi S ed S_1 sono paralleli. Dall'altro lato

è fissato al settore un cannocchiale D, il cui asse ottico è parallelo al piano del settore; esso è diretto verso lo specchio S_1.

Per misurare l'angolo delle due visuali di due punti C e B, si tenga lo strumento con una mano, inclinandolo in modo che i due punti C e B siano approssimativamente nel piano del settore; col cannocchiale si mira il punto C attraverso la parte trasparente di S_1; si vede insieme l'immagine di B riflessa dai due specchi, in generale distinta dalla immagine di C. Indi si muova con l'altra mano l'alidada M *finchè le due immagini si sovrappongano*; ciò ottenuto si legge sull'arco graduato la divisione corrispondente allo zero del nonio; essa indica l'angolo dei due specchi.

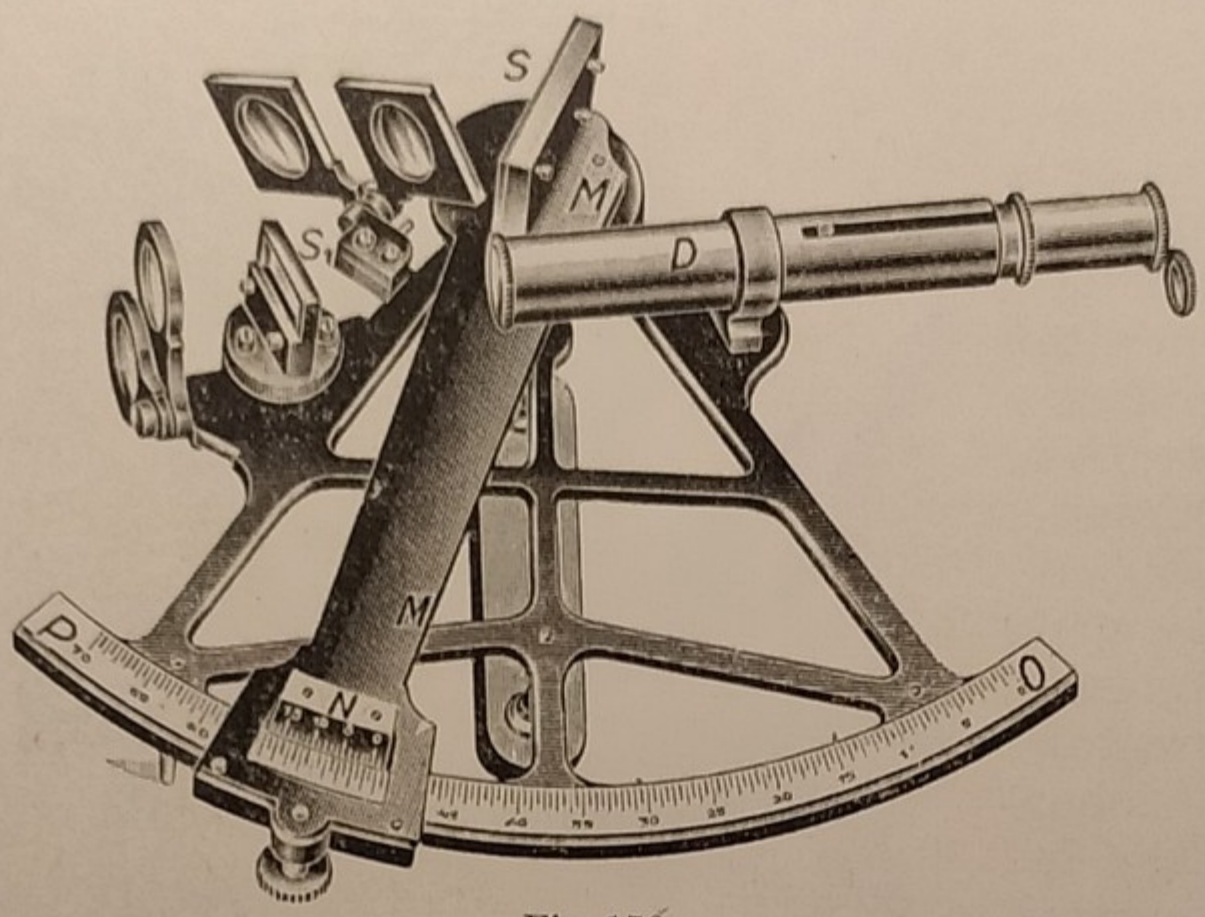


Fig. 170.

Come si è detto avanti, l'angolo cercato è il doppio dell'angolo dei due specchi; per evitare operazioni aritmetiche, la graduazione sull'arco OP è numerata come se i mezzi gradi fossero gradi; in tal modo l'angolo letto è quello cercato.

Problemi da risolvere.

1. Una macchina fotografica è provvista di un obiettivo di cm.15 di distanza focale, montato su un tubo filettato al passo di mm.5. Stabilire una tabella con le rotazioni che si devono imprimere al tubo dell'obiettivo, partendo dalla posizione corrispondente alla messa a fuoco all'infinito, perchè si abbiano le immagini nette di punti posti a m.10, m.5, m.2,50, m.1,50 dall'apparecchio.

2. Con un dato apparecchio fotografico, diaframmando con $F : 5$, si richiede la posa di 0,25 secondi. Qual'è la posa necessaria se il diaframma si restringe ad $F : 16$?

3. Davanti ad una lente convergente di 3 cm. di distanza focale, è collocato un piccolo oggetto, tra il fuoco e la lente, ad 1 cm. dal fuoco; la distanza fra il centro ottico dell'occhio e quello della lente è di 5 cm. Si domanda a quale distanza dal centro ottico dell'occhio si formerà l'immagine dell'oggetto, e quanto sarà l'ingrandimento.

4. Calcolare quant'è l'ingrandimento di un microscopio semplice di mm.10 di distanza focale, per un miope e per un ipermetropico, il cui difetto è di 5 diottrie.

5. In un microscopio composto la distanza focale dell'obiettivo è di mm.2 e quella dell'oculare è di mm.10; calcolare l'ingrandimento, per un occhio normale, se la lunghezza del tubo che porta le lenti è di cm.18.

6. La distanza focale dell'obiettivo di un cannocchiale astronomico è di m.2,50; quale dev'essere la distanza focale dell'oculare, per ottenere un ingrandimento di 200 volte; e quale il diametro dell'obiettivo, se si vuole una chiarezza doppia che ad occhio nudo? (Si supponga il diametro della pupilla di mm.6, e un rendimento luminoso del 60%).

Fotometria.

81. **Intensità luminosa - Unità di luce.** — Quantunque la luce non sia materia, pure ce la raffiguriamo come *qualche cosa* che emana dalle sorgenti luminose; e diciamo che se un corpo viene illuminato *riceve luce*, e se si oscura *perde luce*.

La luce è una grandezza suscettibile di misura. Se due lampade illuminano (a giudizio dell'occhio) alla stessa distanza egualmente lo stesso corpo, diciamo che hanno *eguale intensità luminosa*; due lampade insieme hanno un'intensità luminosa che è la somma di quelle di ciascuna di esse; n lampade eguali hanno insieme un'intensità n volte quella di ciascuna di esse, e ognuna $1/n$ di quella totale delle n lampade. Cioè per l'**intensità luminosa** sono soddisfatte le condizioni che definiscono una *classe di grandezze*. Supporremo per ora che si tratti anche di grandezze continue; cioè che l'intensità di una sorgente luminosa possa variare di una quantità piccola a piacere; mentre vedremo in seguito (§ 230) che ciò a rigore non si può ammettere.

Per misurare allora l'intensità di una sorgente luminosa, occorre prima definire l'**unità di luce.**

È stata assai adoperata nel secolo scorso l'unità francese **Carcel,** che è: *la luce emanata da una lampada di date dimensioni* (Fig. 171), *che consuma 42 g. di olio di colza depurato ad ogni ora, con una fiamma alta 35 mm.*

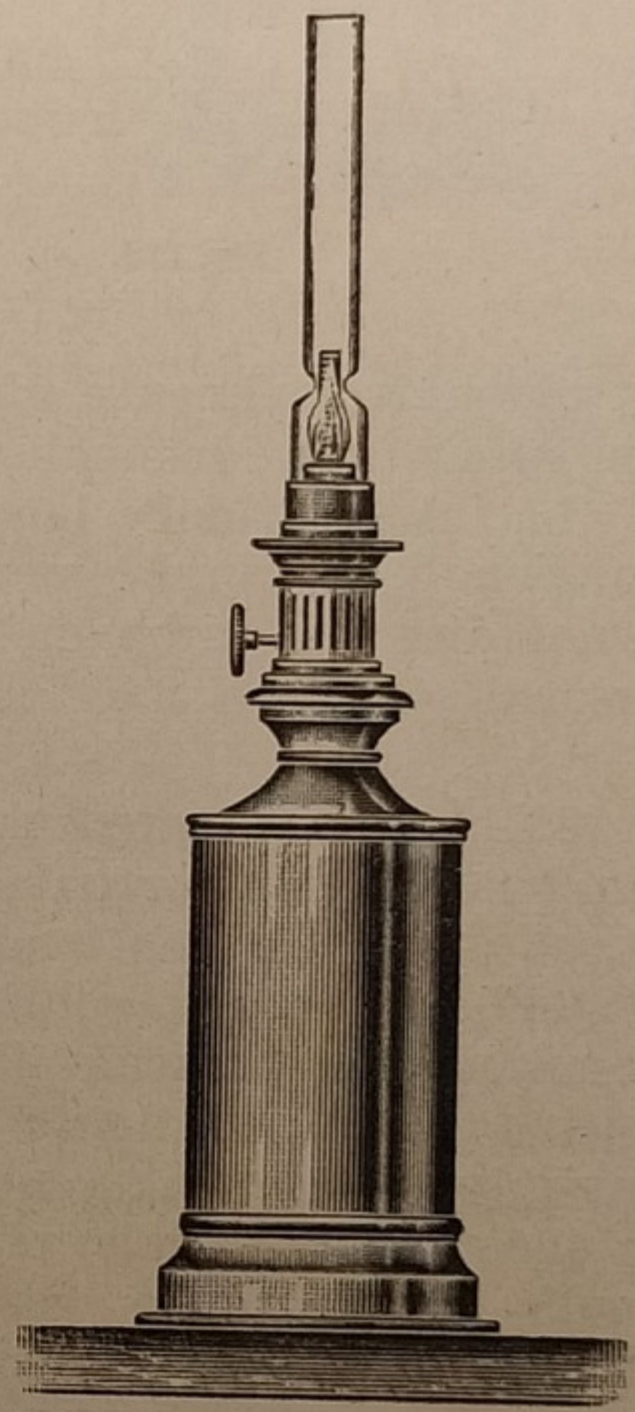


Fig. 171.

In Inghilterra fu adottata una speciale **candela** di spermaceti, di $1/6$ di libra.

Siccome la luce di queste lampade varia con la qualità del combustibile impiegato, che è di composizione variabile, e con lo stato dello stoppino più o meno carbonizzato, in Germania fu scelta come unità la luce di una lampada **Hefner** *ad acetato di amile* (sostanza combustibile di composizione ben definita e costante), con stoppino di amianto (incombustibile).

Ma in tutte queste lampade, in cui la luce è dovuta alla combustione, l'intensità di essa dipende anche dalle condizioni del comburente (pressione e composizione dell'aria in cui avviene la combustione). Per eliminare tale influenza, fu adottata in apposito Congresso internazionale, tenutosi a Parigi nel 1884, l'**unità Violle** [1], che *è la luce emessa in direzione perpendicolare, dalla superficie di 1 cm² di platino, alla temperatura di fusione* (1775° C).

---

(1) Violle Jules Louis; n. a Langres (Marna) nel 1841.

L'unità così definita ha caratteri di costanza e di esattezza quasi perfetti; la Fig. 172 indica una disposizione per ottenerla in pratica. Il platino si fonde con un cannello ossidrico, in un crogiuolo di calce; il fascio di luce emanato dalla superficie è limitato da un diaframma AA', con foro di 1 cm², tenuto freddo con circolazione di acqua, e viene portato in direzione orizzontale con uno specchio opportuno.

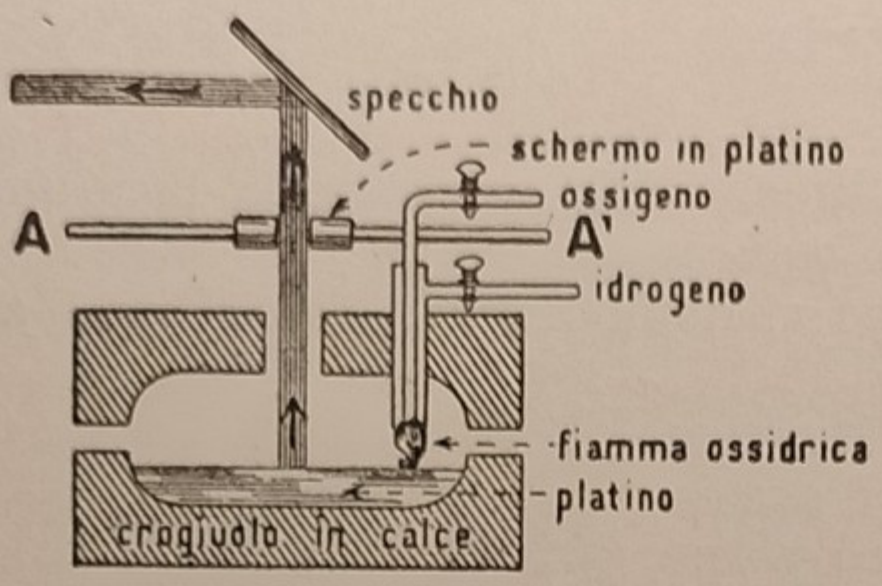


Fig. 172.

L'unità Violle equivale a 2,08 unità Carcel; essendo troppo grande per la pratica, si usa comunemente la **candela decimale,** che è il *ventesimo della Violle*[1], ed approssimativamente eguale all'unità Hefner ed alla candela inglese. Oggi è più universalmente adottata come unità la **candela internazionale,** molto prossima alla decimale (1 cand. internazionale = 0,994 cand. decimali).

La intensità delle lampade comuni si misura adunque in candele internazionali, o semplicemente *in candele*; così, una lampada da 50 candele, vuol dire una lampada la cui intensità luminosa è di 50 cand. internazionali, ossia di 2,5 Violle circa.

82. **Intensità media sferica.** — L'intensità di una sorgente luminosa in generale non è eguale in tutte le direzioni dello spazio, attorno ad essa. Così, ad es., in una lampada ad arco (§ 286) a corrente continua, coi carboni ad asse verticale (il carbone positivo in alto), l'intensità luminosa ha un'intensità massima nella direzione a 45° con la verticale; mentre è quasi nulla in direzione verticale, verso l'alto. Sia S una sorgente luminosa (puntiforme), e il piano del foglio un piano α passante per essa. Consideriamo le semirette di α aventi l'origine in S, e su ciascuna di esse prendiamo un segmento con un estremo in S la cui lunghezza sia proporzionale all'intensità luminosa nella direzione della semiretta considerata. Riunendo gli altri estremi di tutti questi segmenti, si ottiene una curva che si chiama la *curva polare* della sorgente S nel piano α. La Fig. 173 mostra la curva polare di un arco voltaico (§ 286); in essa si vede quanto avevamo detto avanti; cioè che l'intensità luminosa è massima nella direzione SA ed è minima nella direzione SB.

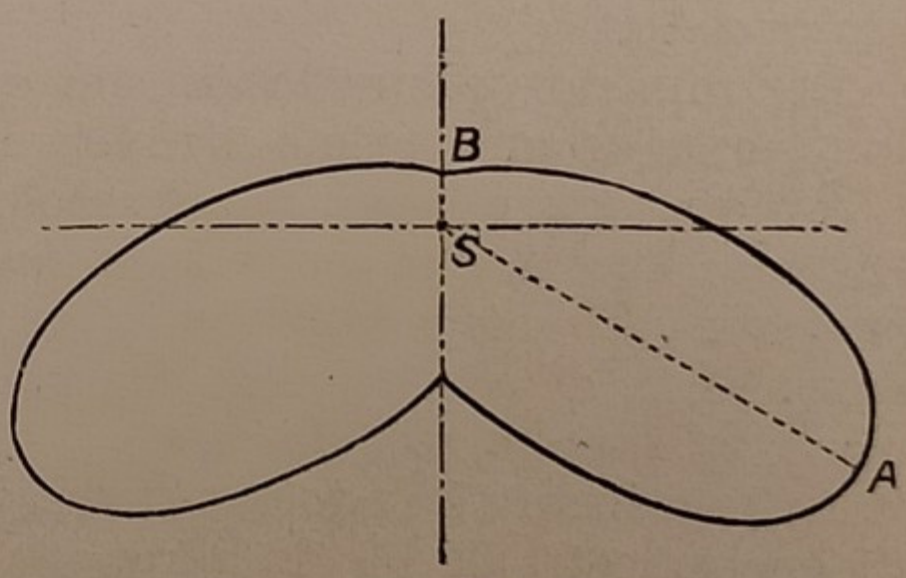


Fig. 173.

La media delle intensità luminose nelle varie direzioni, si chiama la **intensità media sferica** della sorgente luminosa.

---

(1) È detta *decimale*, perchè si era antecedentemente definita come un decimo della Carcel.

83. **Intensità ed unità di illuminazione.** — Il nostro occhio ci permette di giudicare se uno schermo è più o meno illuminato di un altro, anche se vi è piccola differenza, ma non permette di valutare di *quanto* l'uno è più illuminato dell'altro. Ripetiamo cioè quanto abbiamo osservato per il calore, che le nostre sensazioni sono qualitative, ma non quantitative.

Si chiama **intensità di illuminazione** o **chiarezza** di uno schermo, *la quantità di luce* (§ 85) *che riceve l'unità di superficie di esso.*

Conveniamo che l'intensità dell'illuminazione varî col numero dei raggi luminosi che cadono sull'unità di superficie del corpo illuminato. Ossia conveniamo che su una superficie illuminata non cada un raggio per ogni suo punto, come sarebbe nel senso geometrico, e quindi in ogni caso un numero illimitato di raggi; ma che tal numero di raggi sia finito e proporzionale all'intensità dell'illuminazione.

L'intensità d'illuminazione di uno schermo può essere costante o variabile da un punto all'altro; così, il Sole illumina uniformemente una parete piana; mentre essa è illuminata diversamente nei diversi punti da una lampada vicina.

L'intensità d'illuminazione di uno schermo dipende:

1. dall'*intensità della sorgente* luminosa;
2. dalla *distanza* dalla sorgente allo schermo;
3. dall'*inclinazione* con cui lo schermo riceve la luce.

Si prende come **unità di illuminazione,** *quella prodotta su uno schermo* (in direzione normale) *da 1 candela internazionale, alla distanza di 1 metro.* Essa si chiama **lux.**

L'illuminazione diretta del Sole equivale a 62000 lux; mentre quella della Luna piena è appena 0,3 lux. L'illuminazione degli ambienti, con lampade, varia da 0,5 a 4 lux; per leggere e scrivere senza fatica, occorrono almeno 15 lux; mentre un tavolo esposto convenientemente alla luce di una finestra, riceve da 50 a 200 lux.

84. **Flusso luminoso.** — Si chiama **flusso luminoso** l'insieme dei raggi luminosi che illuminano una data superficie. Se questa è circolare, ed il punto luminoso da cui provengono i raggi è sull'asse di tale cerchio, questo è la base di un cono che ha il vertice sul punto luminoso. Si può allora anche definire il flusso luminoso l'insieme dei raggi luminosi racchiusi nell'angolo solido di tal cono.

Avendo convenuto (§ 83) di considerare il numero dei raggi che colpiscono una superficie proporzionale all'intensità della illuminazione, il flusso luminoso è allora il prodotto dell'intensità della illuminazione per la superficie illuminata. Ciò, naturalmente, supponendo l'intensità della illuminazione costante; se non lo fosse, considereremo l'*intensità luminosa media* per quella superficie illuminata. Chiamando I tale intensità media, s la superficie illuminata, Φ il flusso luminoso, si può scrivere:

$$1) \qquad \Phi = I\,s\,.$$

Dalla 1) si può ricavare l'**unità di flusso**; sarà $\Phi = 1$ per $I = 1$ ed $s = 1$; cioè *l'unità di flusso è quella che illumina l'unità di superficie, se l'intensità dell'illuminazione è uno.* Praticamente si prende per unità di superficie

il m^2 e per unità di illuminazione il *lux* (§ 83); l'unità di flusso allora si chiama **lumen.**

Poichè (§ 83) il *lux* era l'illuminazione di una candela alla distanza unitaria (1 m.), a questa distanza l'unità di superficie è illuminata con 1 *lux* allorchè l'intensità della sorgente luminosa è di 1 candela, e l'angolo solido che proietta tale unità di superficie dal punto luminoso è l'angolo unitario; quindi si può anche dire che: *il lumen è il flusso di una candela internazionale nell'angolo solido unitario.* Se l'intensità della sorgente è I (cand.) e l'angolo solido in cui essa irradia è ω, il flusso luminoso irradiato è in tal caso:

$$\Phi = I\,\omega\,, \qquad \text{formula equivalente alla 1).}$$

Il flusso totale irradiato da un punto luminoso in tutto lo spazio che lo circonda, cioè per tutto l'angolo solido $\omega = 4\pi$, è:

2) $\Phi = 4\,\pi\,I.$ In tal caso si considera I costante in tutte le direzioni; altrimenti per I si deve intendere l'*intensità media sferica* definita nel § 82.

85. **Quantità di luce.** — Vedremo presto (§ 92) che la luce si suppone sia un moto vibratorio dei punti luminosi, trasmesso per mezzo dell'*etere cosmico.* Cioè la luce è movimento, quindi una forma di energia. Il flusso luminoso è allora da considerarsi come una erogazione continua di energia, cioè come una *potenza* (Vol. 1° - § 122). Se si fissa il tempo per cui il flusso viene erogato, allora la potenza per un dato tempo corrisponde ad un *lavoro*; cioè il prodotto del flusso luminoso Φ per il tempo t in cui è irradiato, forma l'*energia luminosa* o la **quantità di luce** Q irradiata:

3) $$Q = \Phi\,t\,.$$

Inversamente, per $t = 1$, si ha dalla 3): $Q = \Phi$, cioè: *la quantità di luce è il flusso luminoso irradiato nell'unità di tempo.* L'**unità** (pratica) **di quantità di luce,** si ha allorchè il flusso è *1 lumen*, e il tempo *1ˢ* oppure *1 ora.* Essa si chiama: nel 1° caso *lumen-secondo*, e nel 2° caso *lumen-ora.*

Il concetto di quantità di luce è più intuitivo degli altri; si può allora assumerlo come punto di partenza, e risalire (in senso inverso) alle altre grandezze della luce. Cioè:

intensità di luce è la quantità di luce che riceve l'unità di superficie (§ 82);

flusso luminoso è la quantità di luce emessa nell'unità di tempo;

intensità luminosa è la quantità di luce emanata nell'unità di tempo nell'angolo solido unitario.

Paragonando la luce all'acqua che scorre in un canale, si ha cioè che:

il flusso luminoso corrisponde alla portata del canale (quantità d'acqua nell'unità di tempo), e la quantità di luce corrisponde al lavoro che dall'acqua può ricavarsi.

86. **Legge delle distanze.** — *L'intensità dell'illuminazione di uno schermo è inversamente proporzionale al quadrato della distanza dalla sorgente.*

Infatti la quantità di luce che partendo da un punto luminoso O (Fig. 174) cade su un quadrato $ABCD$, posto da O a distanza, ad es., di 1 m, a distanza doppia cadrebbe su un quadrato $A'B'C'D'$ di lato doppio, e quindi

di area *quattro volte maggiore* del primo. Perciò, su un quadrato eguale ad $ABCD$, posto alla distanza di $A'B'C'D'$, cadrebbe la quarta parte della luce che cade su $ABCD$; quindi a distanza doppia l'intensità dell'illuminazione è di un quarto; parimenti a distanza tripla sarebbe di un nono, ecc.

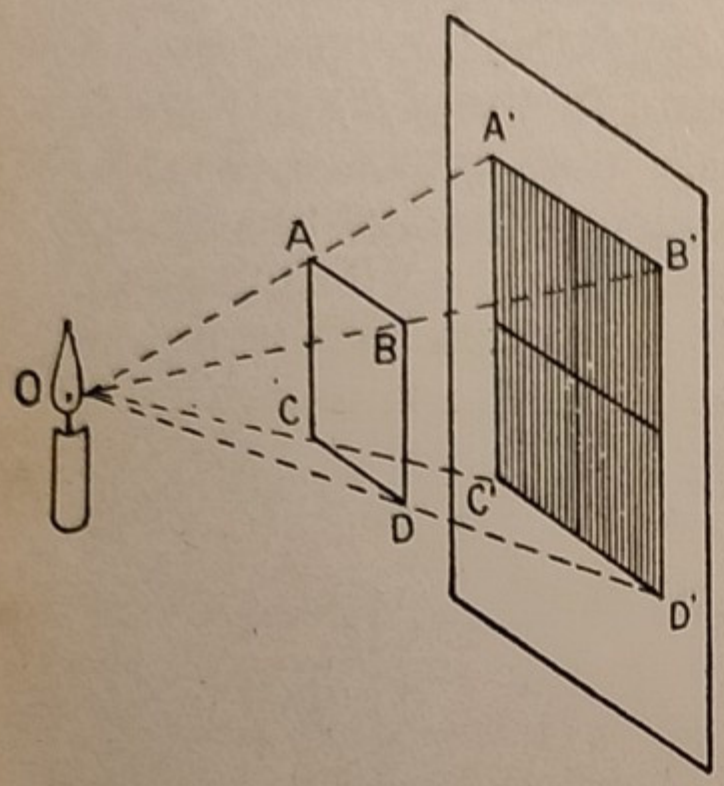


Fig. 174.

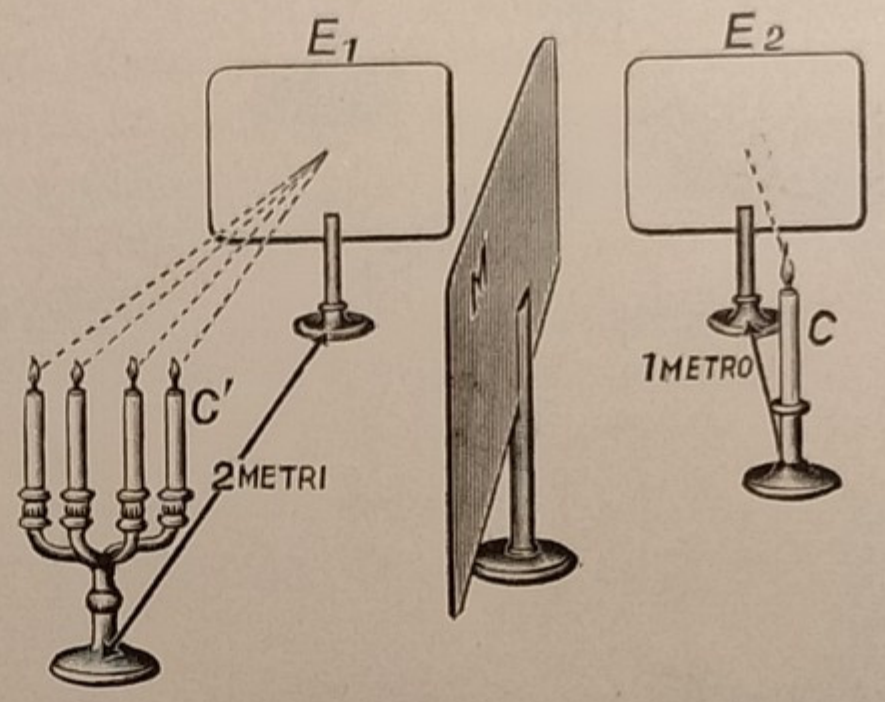


Fig. 175.

La verifica sperimentale si può fare nel modo seguente. Poniamo due sorgenti luminose, costituite: l'una di una candela C, l'altra di quattro candele C', ai due lati di un tramezzo opaco M, che separa due schermi E_1 ed E_2 (Fig. 175). Se vogliamo illuminare egualmente i due schermi, si dovrà collocare C' a distanza doppia (e non quadrupla) di C. Cioè, a distanza doppia una sola candela illumina la quarta parte, come appunto vuole la legge delle distanze.

La medesima esperienza dice che: *le intensità luminose di due sorgenti, che illuminano egualmente uno schermo, sono direttamente proporzionali al quadrato delle rispettive distanze dallo schermo.*

Chiamando con I_1 ed I_2 le intensità luminose di due sorgenti, e con d_1 e d_2 le loro distanze da uno schermo egualmente illuminato da esse, si ha:

4) $$I_1 : I_2 = d_1^2 : d_2^2.$$

Esempio. — *Due candele illuminano una parete a 50 cm. di distanza; quante candele occorrono per illuminare egualmente la stessa parete a m.1,50 di distanza?*

Sarà:

$$2 \text{ cand.} : x = 50^2 : 150^2; \qquad \text{da cui:} \qquad x = \frac{150^2 \times 2}{50^2} \text{ cand.} = \mathbf{18 \text{ candele.}}$$

Sulla legge delle distanze è basata la **fotometria,** che si propone di misurare l'intensità delle sorgenti luminose; gli apparecchi adoperati per questa misura, si chiamano **fotometri.**

Problema. — *Un punto luminoso, posto al centro di una sfera cava del raggio di m.2, ne illumina la superficie interna con l'intensità di 100 lux. Quale sarebbe quest'intensità, se il raggio della sfera divenisse m.5?*

Soluzione. — Per la 4), chiamando x l'intensità d'illuminazione nel secondo caso, dev'essere:

$$x : 100 = 2^2 : 5^2 \qquad \text{ossia:} \qquad x : 100 = 4 : 25; \qquad \text{da cui:}$$

$$x = \frac{4 \times 100}{25} \text{ lux} = \mathbf{16 \text{ lux.}}$$

87. **Fotometro di Bunsen.** — I varî fotometri differiscono per il modo con cui si valuta l'eguaglianza della illuminazione prodotta dalle due sorgenti luminose. Uno dei più noti, sebbene alquanto antico, è il **fotometro di Bunsen**[1]. Esso è basato sul fatto seguente: si abbia un pezzo di carta bianca *E*, nel centro della quale vi sia una macchia di grasso (p. es., di stearina). Questa appare più chiara su fondo scuro, se illuminata di dietro (Fig. 176); appare più scura su fondo chiaro, se è illuminata davanti, cioè

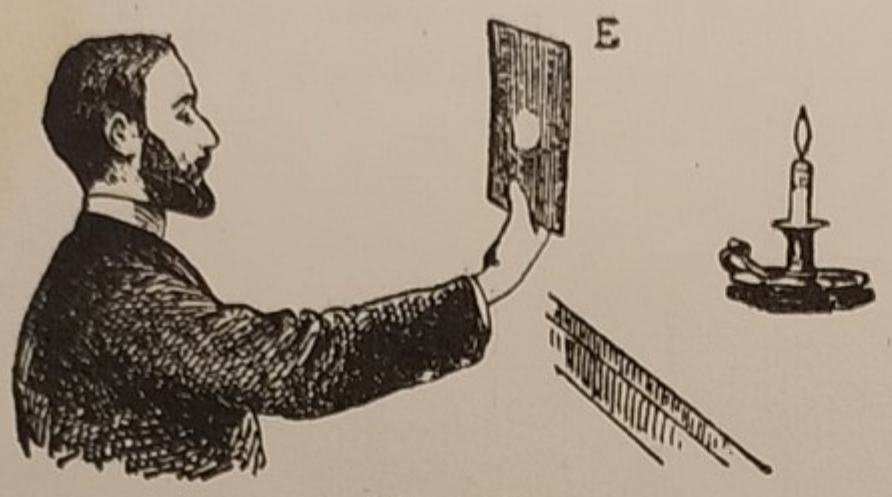


Fig. 176.

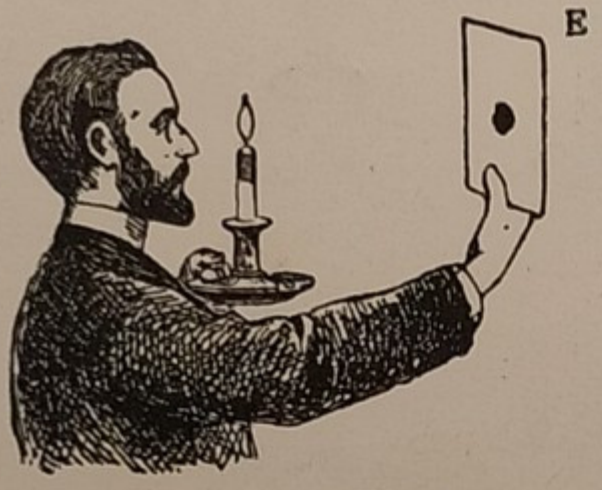


Fig. 177.

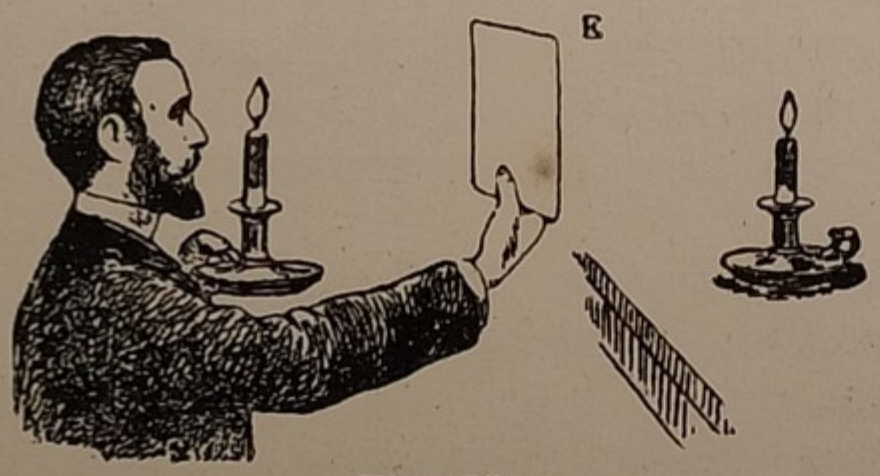


Fig. 178.

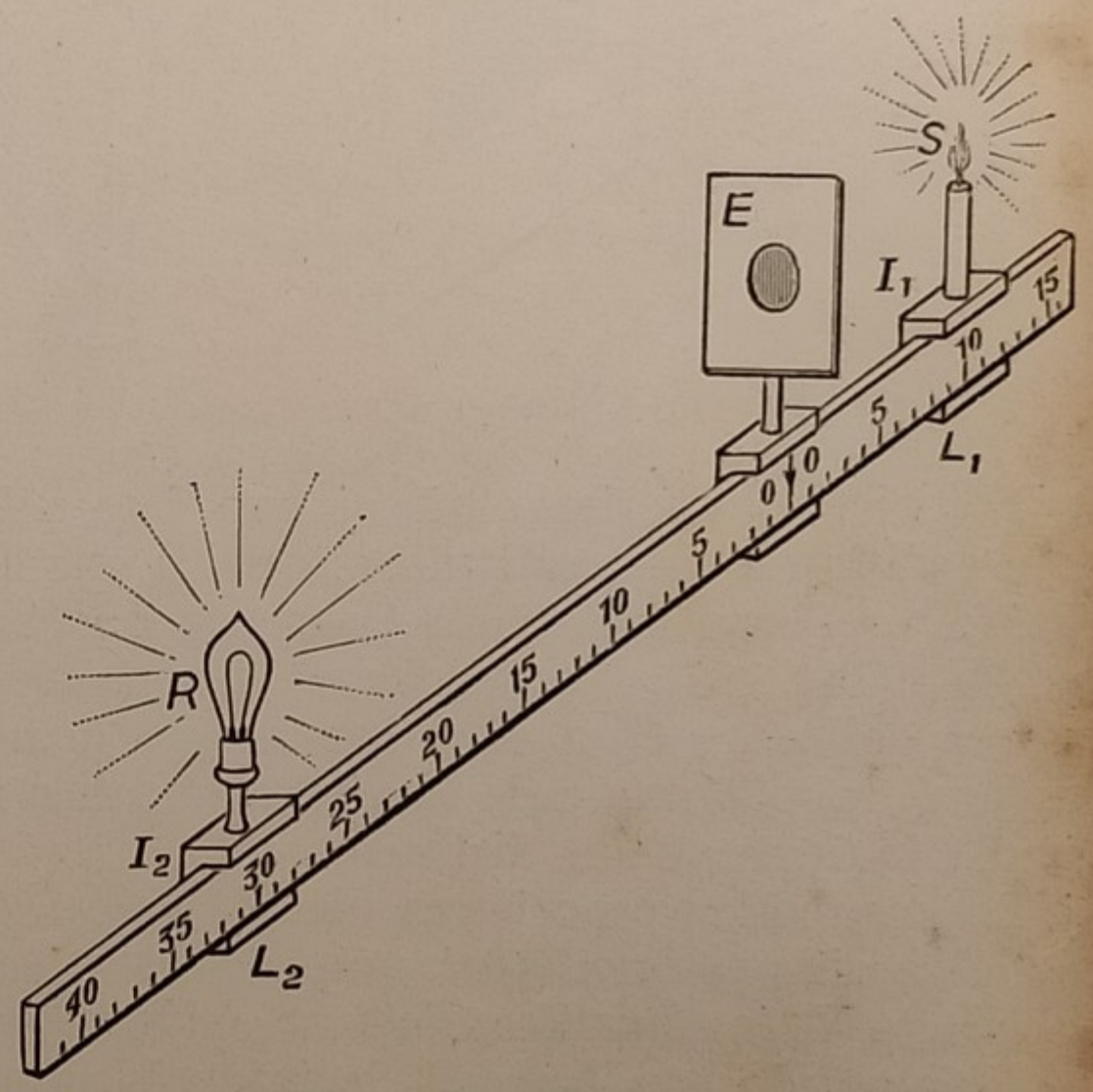


Fig. 179-(*a*).

dalla parte da cui si guarda (Fig. 177); se poi è illuminata egualmente sulle due facce, la macchia scompare, confondendosi col fondo della carta (Fig. 178).

Ciò posto, due sorgenti luminose *S* ed *R*, l'una di intensità I_1 nota, l'altra di intensità I_2 da misurare, si pongano su due sostegni L_1-L_2 (Fig. 179-*a*), che possano scorrere lungo un regolo graduato, da parti opposte rispetto al foglio di carta *E* con la macchia. Si varia per tentativi la loro distanza dalla carta, finchè la macchia scompare. Si leggono allora sul regolo le distanze *SE* ed *RE* delle due sorgenti dalla carta; sarà:

$$I_1 : I_2 = (SE)^2 : (RE)^2 ; \qquad \text{da cui:} \qquad I_2 = I_1 \frac{(RE)^2}{(SE)^2} .$$

Esempio. — Nel caso della Fig. 179-*a*, è:

$$I_2 = I_1 \frac{(30)^2}{(10)^2} = 9\, I_1 ;$$

cioè *R* è 9 volte più intensa di *S*.

---

(1) Bunsen Robert Wilhelm, chimico; n. a Göttingen nel 1811, m. ad Heidelberg nel 1899.

Osserviamo che la posizione in cui scompare la macchia si raggiunge solo se le due sorgenti luminose sono della stessa natura. Per sorgenti luminose diversamente colorate, non vi è alcun punto in cui la macchia scompare. Ma in questo caso occorre scindere la luce composta delle sorgenti, nelle luci semplici che la costituiscono (§ 43), e misurare separatamente l'intensità di queste. Ciò si fa con opportuni apparecchi, chiamati **spettrofotometri**, che non descriviamo.

Simili al fotometro Bunsen sono gli altri più recenti:

il *fotometro Leeson*, in cui la macchia di grasso è sostituita da una stella di carta traslucida.

il *fotometro Siemens* in cui la macchia è ottenuta con un sottilissimo strato d'argento traslucido, tra due lastre di vetro smerigliato.

88. **Fotometro di Rousseau.** — Abbiamo visto che nel caso in cui l'intensità luminosa non è costante in tutte le direzioni, occorre misurare l'*intensità media sferica* (§ 82). Ciò non può farsi col fotometro di Bunsen; ma può farsi col *fotometro di Rousseau*, che permette la misura del rapporto delle intensità luminose della stessa lampada in due direzioni qualsiasi. Esso è formato di un disco A (Fig. 179-b) opaco graduato in 360°, attorno a cui ruotano due alidade a e b graduate in cm; su queste si spostano rispettivamente due specchietti piani M ed N inclinabili a piacere e due asticelle opache m ed n, perpendicolari al piano del disco; sul centro di questo è disposto uno schermo S anch'esso perpendicolare al disco. La lampada di cui si cerca l'intensità, è posta dietro il disco A, in corrispondenza del centro, e invia luce sugli specchi, che si inclinano in modo da rifletterla sullo schermo S; sul cammino dei raggi riflessi sono le due asticelle m ed n di cui viene proiettata l'ombra, una accanto all'altra, sullo schermo S. Queste due ombre sono di intensità diversa; ma spostando opportunamente i due specchi M ed N sull'asta che li sostiene, si può fare in modo che le due ombre risultino di eguale intensità. Si leggono sulle aste le distanze di M ed N dallo schermo, se ne fa il doppio e siano d_1 e d_2 tali doppi; allora le intensità i_1 ed i_2 della sorgente luminosa nelle direzioni delle due alidade sono tali che:

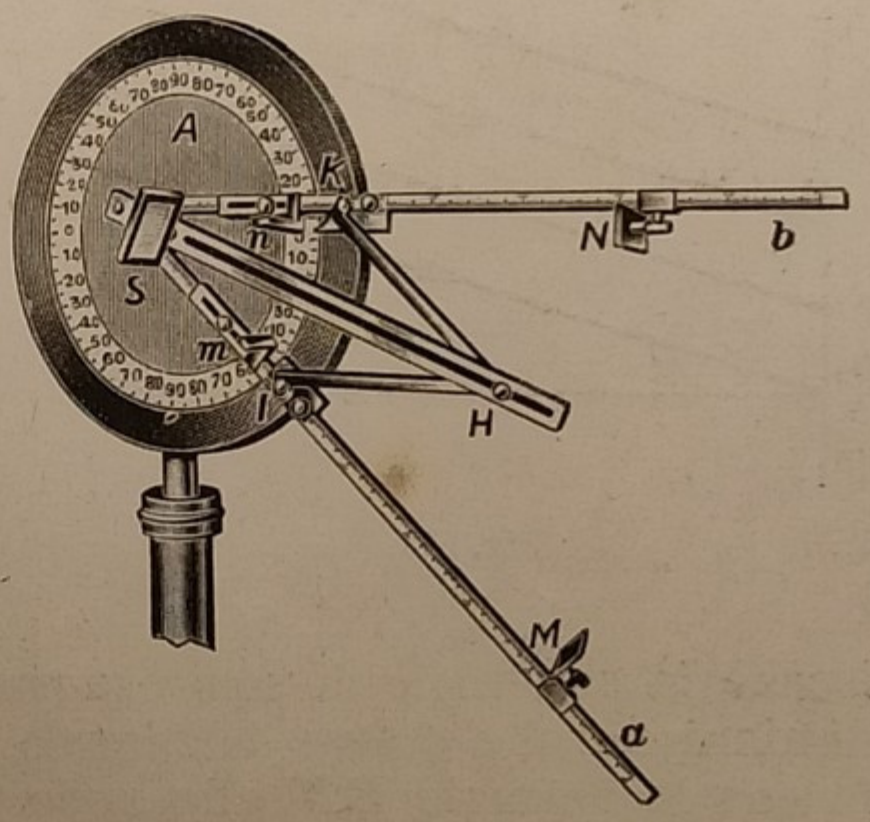


Fig. 179-(b).

$$i_1 : i_2 = {d_1}^2 : {d_2}^2.$$

Naturalmente bisogna misurare in candele l'intensità in una direzione determinata, per trovare quella in tutte le altre direzioni.

Vi sono poi dei **fotometri integratori** che permettono di determinare con una lettura sola l'intensità media sferica delle lampade; tali, ad es., sono l'**integratore Matthews** e la **sfera di Ulbricht**, che non descriviamo.

89. **Splendore - Legge del coseno.** — Se la sorgente luminosa non è un punto, è evidente che l'intensità luminosa di essa cresce proporzionalmente alla sua superficie s:

5) $$I = k s .$$

Il coefficiente di proporzionalità k si chiama **lo splendore** della sorgente; esso è uguale al valore di I per $s = 1$, cioè: *lo splendore è l'intensità luminosa dell'unità di superficie.* Lo splendore quindi dipende dalla vivezza della sorgente luminosa, ed è tanto maggiore quanto più essa è abbagliante. La sorgente luminosa di maggiore splendore è il Sole per il quale è: $k = 930$ cand/mm²; poi viene l'arco voltaico (§ 286), per il quale è: $k = 130$ cand/mm²; per le lampadine a filamento metallico (§ 285) è: $k = 1{,}5$ cand/mm²; per la fiamma di una candela è $k = 0{,}005$ cand/mm². Se lo splendore di una sorgente situata nel campo della visione supera 0,01 cand/mm², si ha l'**abbagliamento,** per il quale la visione diviene confusa e l'occhio si stanca e soffre.

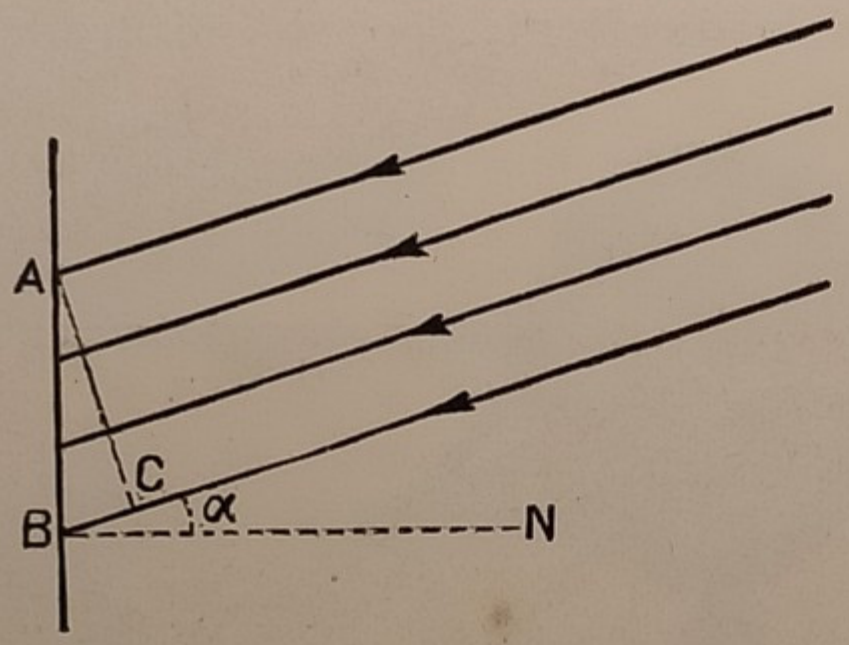


Fig. 180.

Sia (AB) la sezione di una superficie piana illuminata da un fascio di raggi paralleli (Fig. 180); la quantità di luce da essa ricevuta è la stessa di quella che riceverebbe la superficie (AC) normale alla direzione dei raggi. Essendo $(AB) > (AC)$, la quantità di luce ricevuta dall'unità di superficie di (AB) è minore di quella ricevuta dall'unità di superficie di (AC); cioè l'intensità di illuminazione di uno schermo è massima allorchè la superficie di esso è normale alla direzione dei raggi luminosi, e diminuisce col crescere dell'*angolo d'incidenza* α che la direzione dei raggi fa con la normale BN alla superficie illuminata.

Essendo: $(AC) = (AB) \cos \alpha$, si ha la **legge del coseno:**

l'intensità d'illuminazione di uno schermo è proporzionale al coseno dell'angolo d'incidenza.

Se (AB) invece è una superficie piana luminosa, che emette luce in direzione obliqua, chiamando con α l'*angolo di emissione* che i raggi emessi formano con la normale alla superficie piana che li emette, con un ragionamento analogo al precedente si trova la **legge di Lambert:**

l'intensità di illuminazione di uno schermo è proporzionale al coseno dell'angolo di emissione.

Questa legge non è valida per i corpi speculari e per i corpi gassosi (vapori e fiamme).

Tenendo conto dell'inclinazione dei raggi luminosi, l'intensità d'illuminazione C, ossia la quantità di luce che riceve l'unità di superficie, posta alla distanza d da una sorgente luminosa piana, di superficie S e di splendore E, essendo e l'angolo di emissione ed i quello d'incidenza, si esprime con la formula:

6) $$C = \frac{E S \cos e \cos i}{d^2} .$$

Problemi da risolvere.

1. Due sorgenti luminose, una di 4 l'altra di 9 cand., distano fra loro 50 cm. In qual punto della loro congiungente occorre collocare lo schermo del fotometro Bunsen, perchè la macchia scompaia?

2. Una lampada ad incandescenza, posta a 2 m. da una parete, la illumina come una carcel a 1 m. di distanza. Qual'è l'intensità della lampada espressa in carcel e in cand. decimali?

3. Assumendo come uno l'intensità d'illuminazione della luce solare alla superficie della Terra, si determini l'intensità d'illuminazione alla superficie degli altri pianeti. (Distanze dal Sole, rispetto alla Terra come 1:

Mercurio = 0,387; Venere = 0,723; Marte = 1,524; Giove = 5,203;
Saturno = 10,539; Urano = 19,183; Nettuno = 30,055).

4. Un soffitto piano, di forma quadrata, di lato a, è rischiarato normalmente da s cm² di platino fondente, posto alla distanza d da esso, sulla perpendicolare condotta dal suo centro. Calcolare l'intensità d'illuminazione al centro del soffitto, nel punto medio ed alla estremità di ciascun lato. Caso particolare: a = m. 4; s = 10; d = m. 2. (Per l'illuminazione ai lati, tener conto dell'inclinazione dei raggi emessi ed incidenti).

5. Due sorgenti luminose d'intensità rispettivamente i ed i_1, sono poste sulla stessa perpendicolare ad una retta a, rispettivamente alle distanze d e d_1 da questa. A quale distanza dal piede di detta perpendicolare si troverà un punto della retta a egualmente illuminato dalle due sorgenti date?

OTTICA FISICA

Natura della luce.

90. **Ottica geometrica ed Ottica fisica.** — Lo studio dell'*Ottica* fatto sin'ora è principalmente basato su costruzioni grafiche; perciò questa parte studiata va sotto il nome di **Ottica geometrica.** Nei capitoli seguenti invece dovremo occuparci dei fenomeni dipendenti dalla natura della luce. Chiameremo perciò questa nuova parte **Ottica fisica.**

91. **Teoria dell'emissione.** — Per spiegare la causa della luce, non possiamo che fare delle ipotesi; poichè la luce non è materia, e la sua vera essenza non cade sotto il dominio dei nostri sensi.

Newton fu l'ultimo sostenitore di una vecchia teoria, affacciata da Empedocle ed accettata da Keplero, detta dell'**emissione**; che supponeva la luce fosse dovuta alla emissione dai corpi luminosi di innumerevoli particelle piccolissime, imponderabili, propagantisi in linea retta, in tutte le direzioni, con la velocità della luce. Secondo questa ipotesi cioè, un raggio luminoso sarebbe costituito da una serie di particelle luminose emesse dalla sorgente, succedentisi in una data direzione. Tali particelle battendo sui

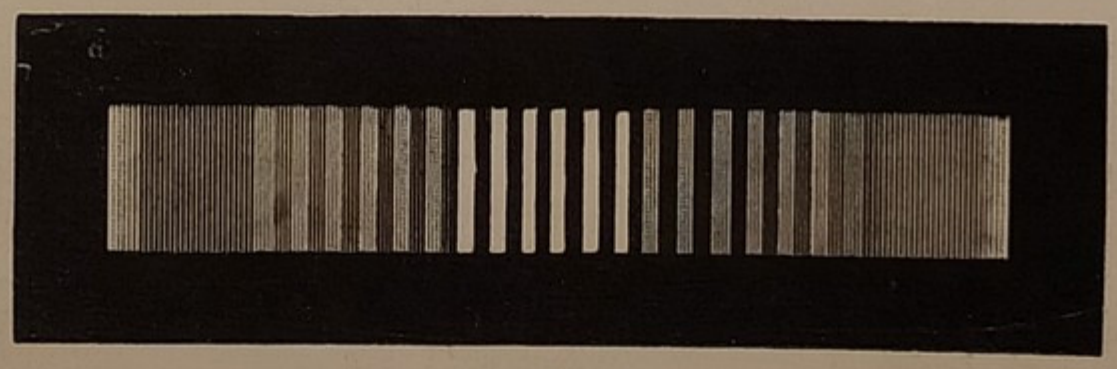


Fig. 181.

corpi rimbalzerebbero, dando luogo alla diffusione (§ 11) ed alla riflessione. Attraversando i mezzi trasparenti, devierebbero dal cammino primitivo (per una ragione che spiegheremo tra poco), dando luogo ai fenomeni di rifrazione; ecc. Per spiegare i diversi colori, Newton supponeva che le particelle luminose avessero grandezza diversa, e perciò destavano sensazioni diverse. Ma fin dai tempi di Newton e sulla fine del '700, si scoprirono dei fatti che non si potevano più spiegare con questa ipotesi. Questi fatti sono quelli delle *interferenze*, *polarizzazione*, *diffrazione*, ecc., di cui daremo cenno nei paragrafi successivi.

Così, p. es., l'esperienza dimostra che se da due segmenti luminosi paralleli e vicini, *di luce identica*, arrivano raggi di luce su uno schermo parallelo al piano dei due segmenti, posto ad una certa distanza da questi, lo schermo non viene illuminato uniformemente; ma vi si scorgono strisce alternativamente chiare ed oscure, come mostra la Fig. 181, che si chiamano le **frange di interferenza.** Questo fenomeno, segnalato da Padre Grimaldi fin dal 1633

ci dice che nei punti delle strisce oscure, pure arrivando luce da entrambi i segmenti luminosi, tuttavia si produce oscurità; esso si chiama l'**interferenza della luce**, e non si può spiegare con la teoria dell'emissione.

Inoltre il Newton si trovò nella difficoltà di dover spiegare come mai un mezzo trasparente sia insieme riflettente e trasparente; come è noto infatti, il vetro comune e l'acqua riflettono parte della luce che li colpisce, e producono immagini riflesse come nello specchio. Da che proviene che i corpuscoli costituenti la luce, colpendo tale mezzo, una volta rimbalzino riflettendosi e un'altra volta proseguano rifrangendosi?

Il Newton dovette immaginare tali corpuscoli dotati di polarità e rotanti su sè stessi; in modo da venire respinti (*riflessione*) o attratti (*rifrazione*) dal mezzo su cui battevano, a secondo del polo con cui colpivano in quell'istante tale mezzo.

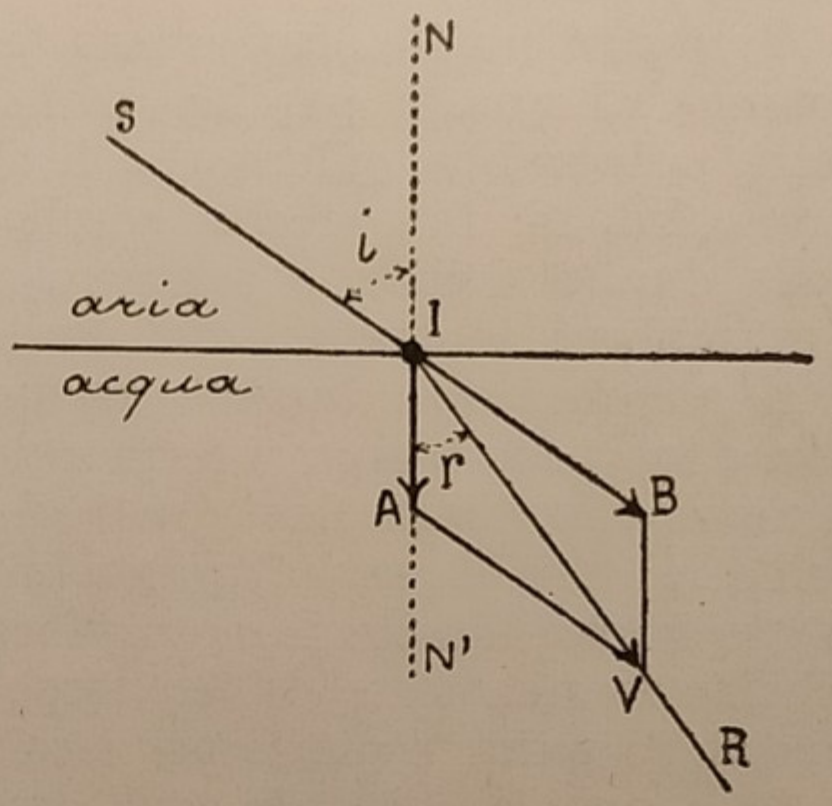


Fig. 182.

Ma se una particella I battendo, ad es., sull'acqua (Fig. 182) viene attratta, essa acquista una velocità IA in direzione perpendicolare alla superficie di separazione dei due mezzi, oltre a mantenere la velocità IB che aveva nel primo mezzo. Il moto nel secondo mezzo è pertanto quello risultante dei due moti IA e IB; cioè è un moto uniforme la cui velocità e direzione è rappresentata dalla diagonale IV del parallelogrammo $IAVB$ (Vol. 1° - § 41) quindi la luce nel secondo mezzo prosegue nella direzione IV, avvicinandosi alla normale, come vuole la legge della rifrazione.

Ma la velocità IV della luce nell'acqua deve essere perciò maggiore che la velocità IB nell'aria. Quando invece Foucault misurando la velocità della luce nell'acqua trovò che essa *è minore che nell'aria* (§ 9), la teoria di Newton si trovò in contrasto con l'esperienza, e dovè cadere [1]. La misura di Foucault della velocità della luce nell'acqua, è adunque il fatto sperimentale che abbattè la teoria dell'emissione.

92. **Teoria delle ondulazioni.** — Caduta la teoria dell'emissione, si doveva fondarne una nuova. È questa la **teoria delle ondulazioni,** che risale ad Aristotele, accettata da Cartesio, ma ripresa e fondata da Huyghens [2], contemporaneo di Newton, nel 1690, e poi meglio completata da Eulero (1746), Young (1801) e Fresnel (1820).

Si suppone che la luce sia dovuta ad un moto vibratorio rapidissimo (da 400 ad 800 trilioni di vibrazioni al minuto secondo) di piccolissima ampiezza, dei *punti* [3] che costituiscono il corpo luminoso. Questo moto

---

(1) Ci siamo alquanto diffusi sulle ragioni per cui cadde la teoria dell'emissione, per dare un esempio dettagliato del modo con cui le teorie possono modificarsi o abbattersi (Vol. 1° - § 7).

(2) Vedasi nota al § 99.

(3) Vedremo al § 231 che cosa dobbiamo intendere per questi punti.

vibratorio viene trasmesso non dall'aria, come per il suono, (perchè la luce si propaga anche nel vuoto interplanetare); ma *da un mezzo sottilissimo, imponderabile, perfettamente elastico*, chiamato l'**etere cosmico**, che esiste dappertutto, fra gli astri, fra le molecole dei corpi, in un'ampolla vuota d'aria, ecc.

È sottilissimo: perchè la luce passi attraverso il vetro, l'etere deve muoversi e vibrare fra le molecole di tale corpo, rispetto alle quali dobbiamo immaginarlo così minuto come il pulviscolo dell'aria rispetto agli oggetti di una stanza.

È imponderabile, cioè senza peso, perchè non è materia [1] nel senso comune di questa parola; altrimenti offrirebbe resistenza al moto degli astri, e dovrebbe rallentarlo; il che non è stato riscontrato con l'osservazione. Infatti, in parecchi secoli non si è riscontrata variazione sensibile nella durata dell'anno terrestre e nella distanza dalla Terra al Sole, che varierebbero col variare della velocità di essa.

È perfettamente elastico: mettendo in vibrazione una lamina d'acciaio essa dopo poco tempo si ferma; perchè la non perfetta elasticità ne smorza il moto vibratorio. Così anche il suono non si propaga a lunga distanza nell'aria, perchè anche questa non è perfettamente elastica, e non trasmette integralmente il moto vibratorio da punto a punto. Invece, il moto vibratorio trasmesso da un corpo luminoso all'etere, si mantiene e si trasmette da punto a punto per secoli e secoli, se dopo tanto tempo ci perviene la luce mandataci dalle stelle lontane.

Si possono ripetere ragionamenti analoghi a quelli fatti per la propagazione del suono; con la differenza che da varî fenomeni (§ 104) siamo indotti a ritenere che la vibrazione dei punti dell'etere non avvenga nella direzione del raggio luminoso, ma in direzione ad esso perpendicolare; cioè *la luce si propaga per vibrazioni trasversali dei punti dell'etere.*

La propagazione avviene anche ora per mezzo di onde sferiche, che non potremo chiamare più condensate o rarefatte (Vol. 1° - § 357); ma che diremo alternativamente *in fase opposta di vibrazione.*

La definizione di lunghezza d'onda, e la relazione di essa col numero delle vibrazioni e con la velocità della luce, sono eguali a quelle fatte per il suono, (Vol. 1° - § 359); cioè se n è il numero delle vibrazioni, λ la lunghezza d'onda, V la velocità della luce, è:

$$1) \qquad V = n\lambda; \qquad n = \frac{V}{\lambda}; \qquad \lambda = \frac{V}{n}.$$

In seguito (§ 357) accenneremo alle odierne vedute sulla natura della luce, che permettono di considerare le vibrazioni luminose, non come vibrazioni delle particelle dell'etere, bensì come vibrazioni elettromagnetiche, che si propagano nel vuoto (**teoria elettromagnetica della luce**). In tal modo non vi è più bisogno di supporre l'esistenza dell'etere cosmico, che è ciò che rende più difficoltosa a concepire la teoria delle ondulazioni. Nelle considerazioni seguenti continueremo tuttavia a parlare di vibrazioni delle particelle dell'etere.

---

(1) Poichè l'etere non è materiale, non cade sotto il dominio dei nostri sensi; quindi la sua esistenza è solo un'ipotesi.

93. **Spiegazione dell'interferenza.** — Con la teoria delle ondulazioni non vi è alcuna difficoltà a spiegare il fenomeno d'interferenza del § 91. La spiegazione è proprio eguale a quella fatta per l'interferenza dei suoni (Vol. 1° - § 377): Supponiamo infatti di avere due punti luminosi vicini O' ed O'' *di luce identica*; cioè i moti vibratori di O' ed O'' siano eguali per frequenza e per fase, (Fig. 183). In un punto P dell'asse del segmento $O'O''$ e quindi equidistante da O' ed O'', arrivano nello stesso istante da questi due punti onde partite contemporaneamente, cioè nella stessa fase di vibrazione. I due moti vibratori quindi si sommano, e in P vi è luce.

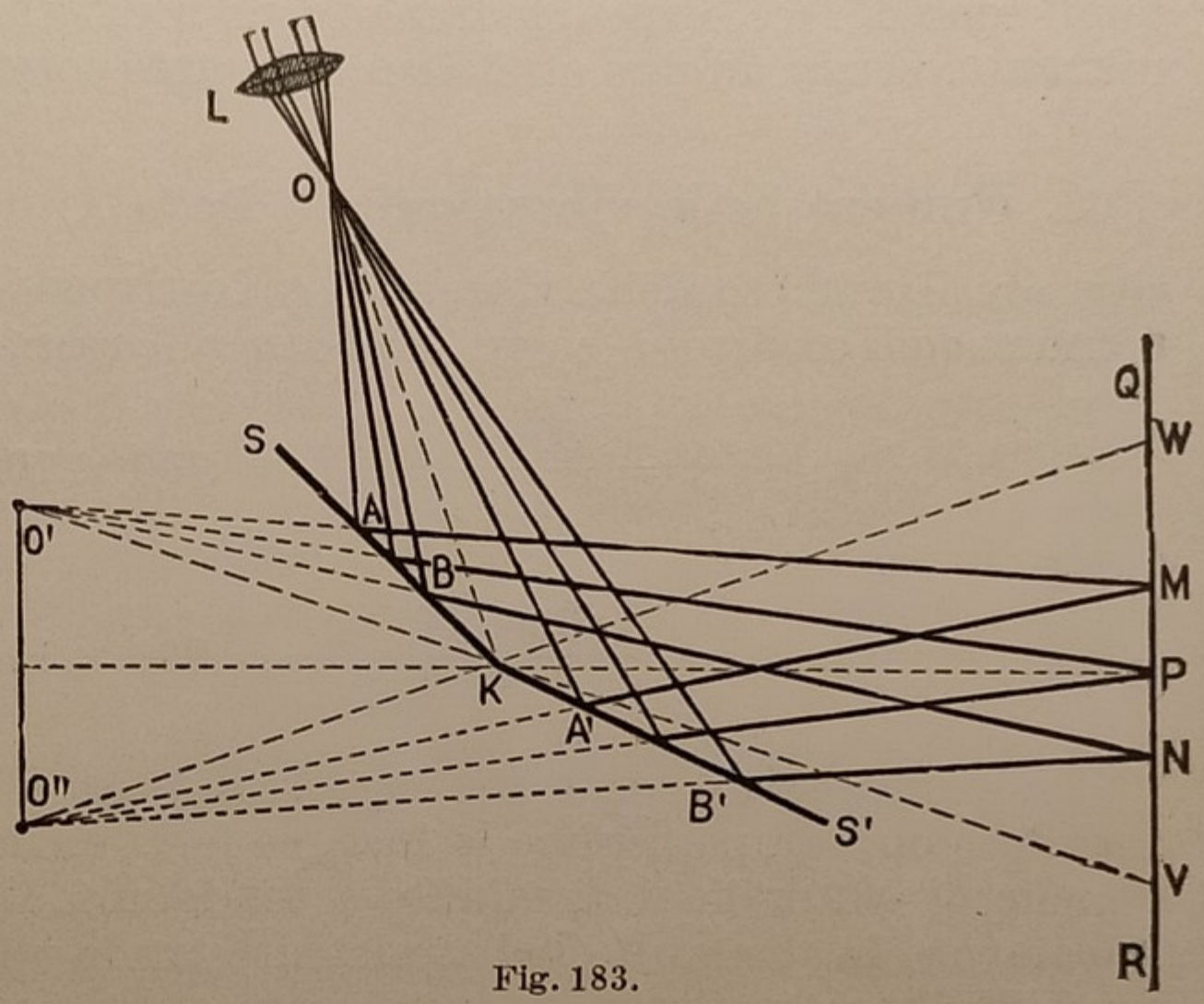


Fig. 183.

Consideriamo invece un altro punto M la cui differenza di distanza da O' ed O'' sia di mezza lunghezza d'onda ($O''M > O'M$). Quando in M arriva da O'' un'onda in una data fase di vibrazione, quella partita contemporaneamente da O' è già passata; da O' arriva invece la mezza onda successiva, che è in fase opposta di vibrazione. Si sovrappongono pertanto in M due moti vibratori opposti che si elidono, e vi sarà perciò oscurità.

Così continuando il ragionamento come per le interferenze sonore, avremo anche ora che:

Vi sarà luce nei punti per i quali la differenza di distanza dai due punti luminosi O' ed O'' è zero o un multiplo pari di mezza lunghezza d'onda; vi sarà invece oscurità nei punti per i quali tale differenza di distanza è un multiplo dispari di mezza lunghezza d'onda.

In pratica non è possibile ottenere due punti luminosi di luce identica con due sorgenti luminose distinte. Si può superare questa difficoltà coi cosidetti *specchi di Fresnel* (1). Cioè si pone un sol punto luminoso O davanti a due specchi piani KS e KS' (Fig. 183), formanti tra loro un angolo quasi piatto; si ottengono di O due immagini O' ed O'' vicine, di luce identica, perchè entrambe identiche ad O. Il punto O si ottiene per concentrazione dei raggi luminosi che attraversano una lente convergente L. Anzichè un punto luminoso, per l'esperienza è più conveniente impiegare un segmento luminoso, ottenuto facendo passare i raggi luminosi per una stretta fenditura.

---

(1) Fresnel Augustin; n. a Broglie nel 1788, m. presso Parigi nel 1827.

94. **Misura della lunghezza d'onda.** — Misurando la distanza tra due frange consecutive, la distanza fra i due punti luminosi O' ed O'', e la distanza di $O'O''$ dallo schermo QR su cui si formano le frange, si può dedurre la differenza di distanza tra una frangia e i due punti luminosi; e così si può calcolare la **lunghezza d'onda.**

Si è trovato che essa ha un valore diverso per i diversi raggi colorati: e precisamente varia da $0{,}76\ \mu$ (1) per la luce rossa a $0{,}39\ \mu$ per la luce violetta. Le frange quindi, a parità delle altre condizioni, hanno distanza diversa a secondo del colore della luce emanata da O' ed O''. Se questi punti sono di luce bianca, le frange sono iridiscenti; cioè ciascuna frangia luminosa equivale ad uno strettissimo spettro solare, coi varî colori dell'iride.

95. **Numero delle vibrazioni.** — Dalla 1) del § 92: $n = \frac{V}{\lambda}$, possiamo ricavare il numero delle vibrazioni n corrispondente alle diverse lunghezze d'onda, cioè ai diversi colori. Si ha per il rosso:

$$n = \frac{300\,000 \text{ km.}}{0{,}76\ \mu} = 400 \times 10^{12} \text{ circa}$$

e per il violetto:

$$n' = \frac{300\,000 \text{ km.}}{0{,}39\ \mu} = 800 \times 10^{12} \text{ circa.}$$

Come l'orecchio è sordo per i moti vibratori troppo rapidi o troppo lenti, così l'occhio non percepisce la luce, se le vibrazioni sono più di 800 trilioni e meno di 400 trilioni al minuto secondo. La differenza tra i varî colori è fisicamente la stessa di quella esistente tra le varie note musicali di un'ottava. Ma mentre l'orecchio percepisce suoni compresi fra 16 e 40 000 vibrazioni al secondo, cioè in un rapporto da 1 a 2400 circa, l'occhio percepisce i colori il cui numero di vibrazioni è appena nel rapporto da 1 a 2.

La seguente Tabella indica meglio la lunghezza d'onda e il numero delle vibrazioni per i varî colori:

COLORE	Lunghezza d'onda in micron	Numero di vibrazioni in trilioni al s.
Rosso medio	0,65	461
Aranciato medio	0,60	500
Giallo »	0,58	517
Verde »	0,52	576
Azzurro »	0,47	638
Indaco »	0,41	731
Violetto estremo	0,39	769

(1) $\mu = 0{,}001$ mm; vedasi Vol. 1° - § 23.

96. **Come si spiega la riflessione della luce.** — Con l'ipotesi dell'emissione era facile spiegare la riflessione della luce, secondo la teoria dell'urto dei corpi elastici; cioè la riflessione delle particelle luminose avverrebbe come quella di una palla d'avorio, contro la sponda del biliardo.

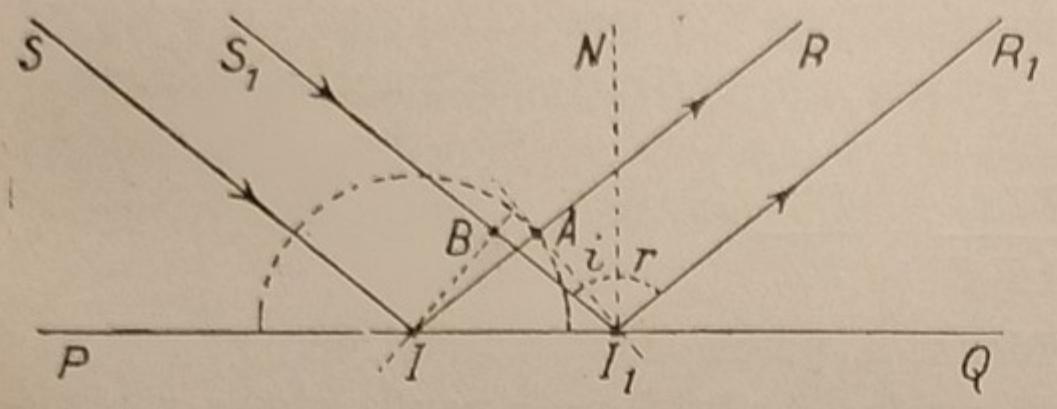


Fig. 184.

Con la teoria delle ondulazioni si spiega nel seguente modo. Ricordiamo che la superficie di un'onda luminosa è sferica, se parte da un punto luminoso a distanza finita; se questo è all'infinito, cioè i raggi luminosi sono paralleli, la superficie dell'onda diventa un piano perpendicolare a tali raggi.

Ciò posto, sia PQ (Fig. 184) la sezione della superficie (piana) dello specchio, SI - S_1I_1 due raggi incidenti paralleli di un fascio; ad un dato istante l'onda passante per I è il piano IB, perpendicolare ad SI. Nel tempo che il moto vibratorio percorre nella direzione S_1I_1 il tratto BI_1, il moto vibratorio dal punto I della stessa onda, percorrerà un tratto eguale a BI_1 in una direzione incognita; cioè perverrà in un punto di una superficie sferica di centro I e raggio IA uguale a BI_1. La nuova onda quindi, passante per I_1, sarà il piano tangente condotto da I_1 a detta sfera; cioè I_1A. La nuova direzione dei raggi riflessi sarà perciò quella IR - I_1R_1, perpendicolare al piano della nuova onda I_1A.

I triangoli IAI_1 ed IBI_1 sono uguali, perchè entrambi rettangoli, hanno l'ipotenusa II_1 in comune, ed $IA = I_1B$ per ipotesi; quindi avranno anche:

$$2) \qquad \widehat{BII_1} = \widehat{AI_1I}\,.$$

Conducendo la normale NI_1 nel punto d'incidenza I_1, l'angolo d'incidenza i è uguale a $\widehat{BII_1}$, perchè hanno i lati perpendicolari e sono entrambi acuti; l'angolo di riflessione r è uguale ad $\widehat{AI_1I}$ per la stessa ragione; quindi dall'eguaglianza 2) risulta: $i = r$, che è la nota legge della riflessione.

97. **Come si spiega la rifrazione della luce.** — Abbiamo visto nel § 91 l'artificiosa spiegazione di Newton con la teoria dell'emissione, pervenendo ad una conseguenza in contrasto con l'esperienza. Con la teoria delle ondulazioni tale contrasto invece non esiste.

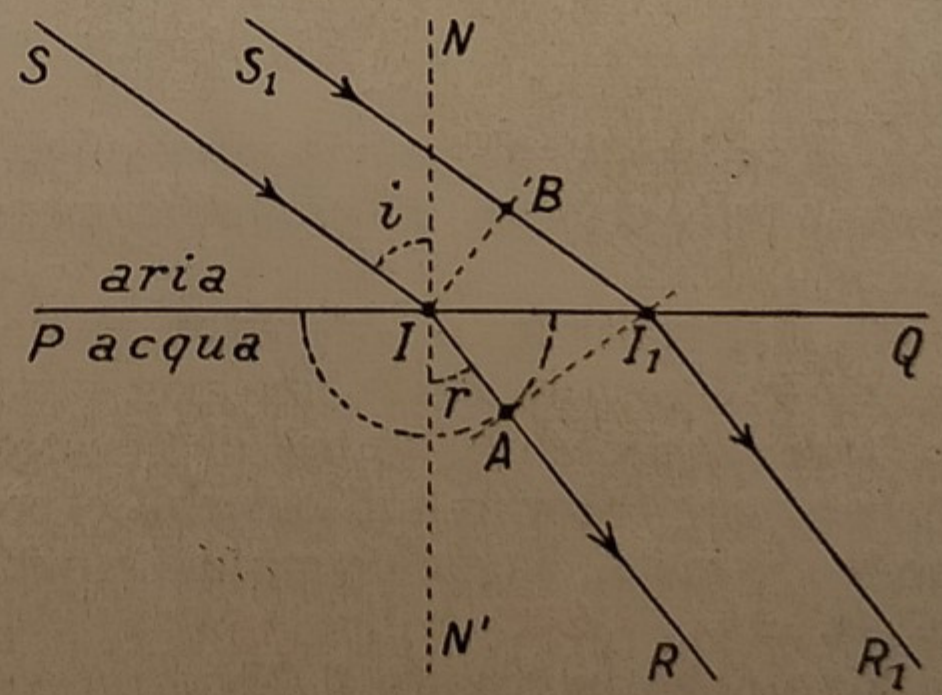


Fig. 185.

Sia PQ (Fig. 185) la sezione del piano di separazione di due mezzi diversi, es., aria ed acqua; SI - S_1I_1 due raggi incidenti paralleli di un fascio; ad un dato istante l'onda passante per I è il piano IB, perpendicolare ad SI. Nel tempo che il moto vibratorio nella direzione S_1I_1 percorre il tratto BI_1 nell'aria, il moto vibratorio del punto I della stessa onda percorrerà nell'acqua un tratto minore di BI_1 (perchè *la velocità della luce nell'acqua è minore che nell'aria*), in una direzione incognita; cioè perverrà in un punto di una superficie sferica di centro I e di raggio IA

minore di BI_1. La nuova onda quindi passante per I_1, sarà il piano tangente condotto da I_1 a detta sfera; cioè (in sezione) I_1A. La nuova direzione dei raggi rifratti sarà perciò IR - I_1R_1, perpendicolare al piano della nuova onda I_1A, e forma con la normale NN' un angolo di rifrazione r minore dell'angolo d'incidenza i; cioè *il raggio rifratto si avvicina alla normale.*

Dal triangolo rettangolo IBI_1 si ricava: $BI_1 = II_1 \text{ sen } \widehat{BII_1}$; dal triangolo rettangolo IAI_1 si ha parimenti: $IA = II_1 \text{ sen } \widehat{AI_1I}$. Dividendo membro a membro si ottiene:

$$\frac{\text{sen } \widehat{BII_1}}{\text{sen } \widehat{AI_1I}} = \frac{BI_1}{IA} .$$

Ora, $\widehat{BII_1}$ è uguale all'angolo d'incidenza i, perchè hanno i lati perpendicolari e sono entrambi acuti, $\widehat{AI_1I}$ è uguale all'angolo di rifrazione r per la stessa ragione; quindi sostituendo:

3) $$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{BI_1}{IA} .$$

Chiamando τ il tempo che impiega la luce a percorrere il tratto BI_1 nel 1° mezzo (aria) e v_1 la velocità della luce nello stesso mezzo, per la legge del moto uniforme (Vol. 1° - § 28) è: $BI_1 = v_1\tau$.

Parimenti, essendo ancora τ il tempo che impiega la luce a percorrere il tratto IA nel 2° mezzo (acqua) e v_2 la velocità della luce nello stesso mezzo, è: $IA = v_2\tau$.

Sostituendo nella 3), si ricava:

4) $$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \frac{v_1}{v_2} .$$

Il rapporto $\frac{v_1}{v_2}$ è costante per due dati mezzi; quindi la 4) esprime la nota legge della rifrazione. Il valore del rapporto $\frac{v_1}{v_2}$ è ciò che avevamo chiamato l'indice di rifrazione relativo ai due mezzi, ed indicato con n, (§ 30). Avevamo anche trovato (§ 39) che: $n = \frac{n_2}{n_1}$, se n_2 è l'indice di rifrazione assoluto del 2° mezzo e n_1 quello assoluto del 1° mezzo. Si ha perciò:

5) $$\frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} ;$$ cioè:

gl'indici di rifrazione assoluti di due mezzi sono inversamente proporzionali alle velocità di propagazione della luce in tali mezzi.

98. **Diffrazione.** — Newton per confutare la nuova teoria che contrastava la sua, obiettava che con l'ipotesi delle ondulazioni non avrebbero potuto sussistere le ombre degli oggetti; perchè le onde luminose dovrebbero girare attorno agli ostacoli e portare luce dietro di essi; così come le onde del mare, battendo su uno scoglio, lo contornano e si propagano dietro ad esso.

Ma anche in questo il Newton errava; il formarsi delle ombre, pure in base alla teoria ondulatoria, dipende dalle grandi dimensioni dei corpi opachi rispetto alla minima lunghezza delle onde luminose. Così le onde del mare se contornano uno scoglio, non possono propagarsi dietro ad un'isola. Alcuni fenomeni, scoperti dal Grimaldi fin dal 1665, dimostrano appunto che avviene il ripiegamento della luce dietro l'ostacolo, in contrasto con la teoria delle ombre (§ 4).

Sia infatti O un punto luminoso e D un diaframma opaco (Fig.186), limitato da un margine AB diritto e sottile; si ponga dietro al diaframma uno schermo M. Per la teoria delle ombre su questo schermo dovremmo osservare una zona di ombra al di sotto della retta PQ, separata nettamente da una zona di luce, al di sopra. Invece attorno a PQ, tanto da una parte che dall'altra si osserva una serie di strisce alternativamente luminose ed oscure; di una sola tinta se da O parte luce monocromatica, o iridescenti se O è di luce bianca. Si chiamano le **frange di diffrazione**, e il fenomeno si chiama **diffrazione.**

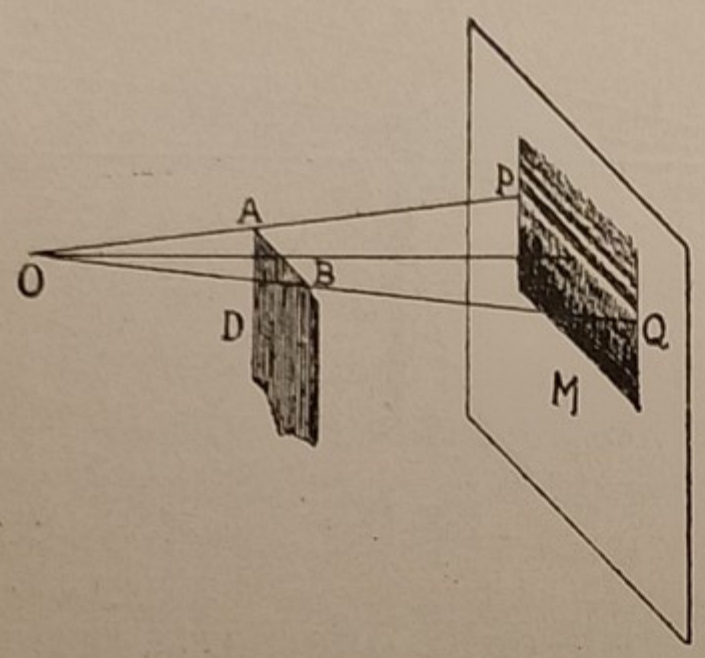


Fig. 186.

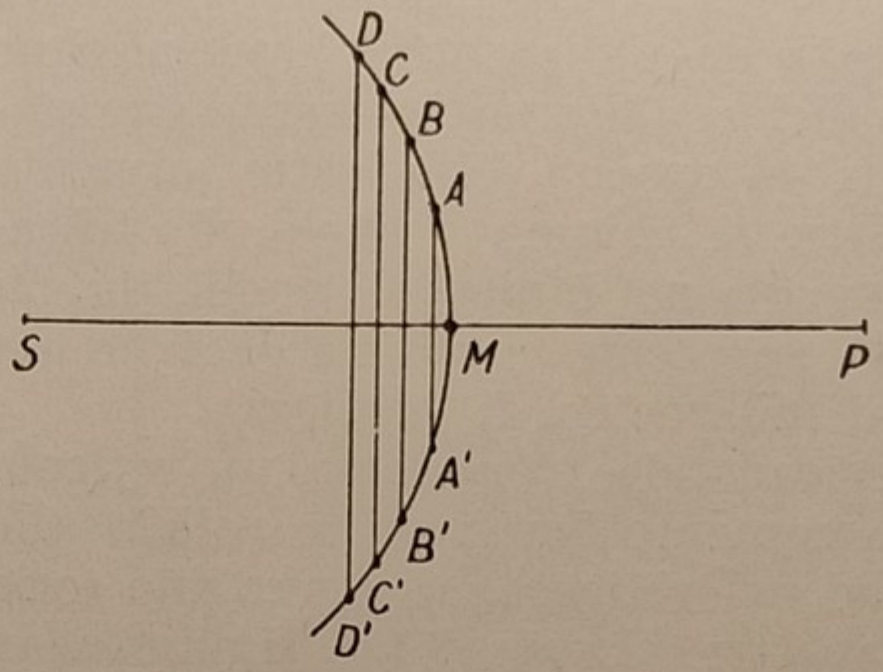


Fig. 187.

99. **Principio di Huyghens.** — La spiegazione del fenomeno precedente è basata sul **principio di Huyghens** (1), che si enuncia così:

Il moto vibratorio, destato da un centro di vibrazione in un punto qualunque dello spazio, è in ogni istante il moto risultante di tutti i moti vibratori che sono inviati a quel punto dai diversi elementi di una qualsiasi superficie d'onda antecedente, considerando ciascuno di questi elementi come un centro particolare di vibrazione.

Ora, sia S un punto luminoso (Fig.187) e DMD' una porzione di una qualsiasi onda (sferica) di centro S. In un punto P dello spazio, per il principio precedente, il moto vibratorio risultante è quello che deriva dai moti vibratori che pervengono in P dai punti dell'onda DMD', considerati come centri di vibrazione. Dividiamo questa superficie d'onda attorno al *polo* M in tante zone elementari: $AMA' - BAA'B' - CBB'C'$...., tali che la differenza della distanza dei punti medî di due zone consecutive da P sia di $^1/_2$ lunghezza d'onda. L'azione di una qualsiasi zona, si annulla con quella della precedente, e della conseguente, che sono in fase opposta; tranne l'azione dell'ultima zona che non ha conseguente, ma che è trascurabile, perchè l'angolo di emissione dei raggi provenienti da essa è prossimo a 90°, (§ 89); e tranne l'azione della 1ª zona AMA', che non ha antecedente. Quest'ultima azione è quella che produce il moto vibratorio nel punto P; che rimane illuminato, con approssimazione, come se ricevesse luce nella sola direzione SP del raggio luminoso. E così avviene ordinariamente.

---

(1) Huyghens Cristian, sommo scienziato olandese; n. a l'Aia nel 1629, m. ivi nel 1695.

100. **Spiegazione della diffrazione.** — Supponiamo che nel cammino dei raggi s'interponga uno schermo opaco O, (Fig.188). In un punto Q di uno schermo NN' perviene in prevalenza il moto vibratorio della semizona $AA'M$, e vi è luce; in un punto R invece perviene in prevalenza il moto vibratorio delle semizone $MAA' - ABB'A'$, in fase opposta, e quindi vi è oscurità. E così via; si formano nella parte sovrastante a P le frange di diffrazione.

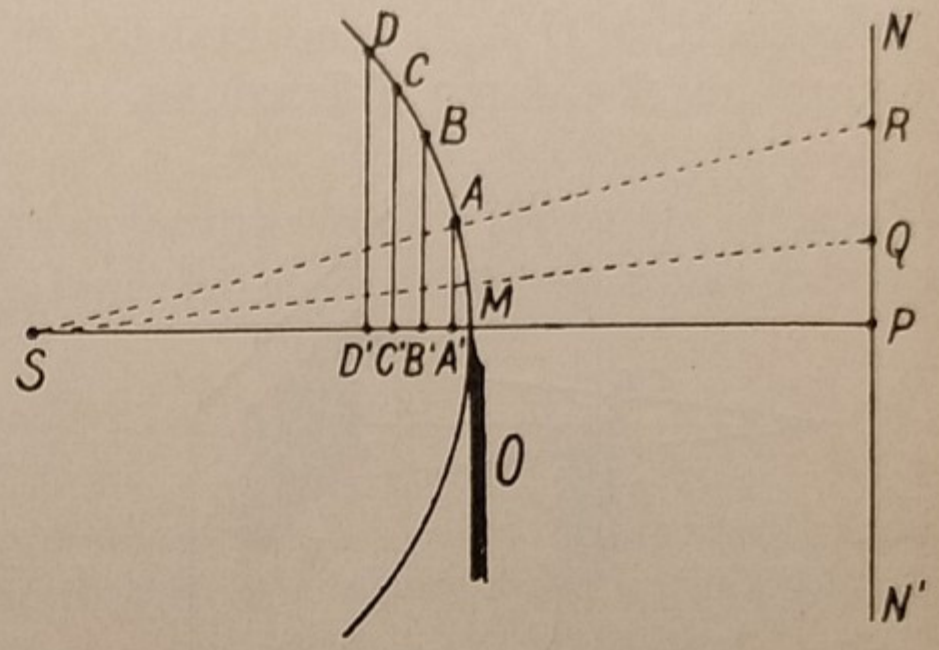


Fig. 188.

Fenomeni simili si hanno se la luce passa attraverso una sottile fenditura, o attraverso una lamina trasparente solcata da righe sottili e vicinissime parallele e alternativamente trasparenti ed opache. Una lastra talmente striata si chiama **reticolo di diffrazione**; se ne fanno di quelli in cui sono parecchie centinaia di righe per ogni millimetro di larghezza.

Guardando attraverso un reticolo un segmento luminoso parallelo alle righe del reticolo, si scorge una serie di spettri colorati (§ 43), simmetricamente disposti dalle due parti rispetto al piano del centro dell'occhio e della sorgente luminosa, col rosso al di fuori e il violetto al di dentro; si chiamano **spettri di diffrazione.** Si possono ottenere anche per riflessione, con **reticoli a riflessione,** solcando con finissime strie delle superfici speculari. I **reticoli di Rowland** sono costruiti su specchi concavi, e dànno direttamente sullo schermo lo spettro luminoso, che può assumere grande lunghezza, perfino di qualche metro; cioè si ottiene con essi una dispersione assai maggiore che non coi prismi.

Analogamente si spiegano: le iridescenze presentate da polveri finissime, come il pòlline di alcuni fiori, le spore di licopodio, le ali di alcune farfalle; le iridescenze della madreperla, dovute a striature finissime, microscopiche, che ne solcano la superficie; le colorazioni che si osservano guardando con gli occhi socchiusi una sorgente luminosa attraverso i peli delle ciglia; le colorazioni che si osservano guardando la fiamma di una candela attraverso le barbe di una piuma collocata vicina all'occhio; le iridescenze di un ago lucente esposto al sole; ecc.

101. **Colori delle lamine sottili.** — I corpi trasparenti in lamine sottilissime, ci appaiono colorati qua e là con tinte diverse e con iridescenze. Così, ad es., la mica e le bolle di sapone.

La spiegazione di questo fenomeno è anche ora basata sulla interferenza tra un raggio di luce riflesso dalla prima superficie della lamina e il raggio riflesso dalla seconda superficie. Infatti sia MN (Fig.189) una lastra sottilissima, rappresentata di spessore esagerato; un raggio di luce AB incidente in B in parte si riflette sulla prima superficie: trascuriamo questo raggio riflesso. In parte prosegue rifrangendosi secondo BC, si riflette in C sulla seconda superficie della lamina, e ritorna indietro emergendo nella direzione DE. Ma in D cade un altro raggio $A'D$, che in parte si riflette anch'esso secondo DE.

Quindi su *DE* si sovrappongono due raggi della stessa luce, ma che hanno *percorso cammino di lunghezza diversa*. Essi cioè possono interferire e dar luogo all'estinzione di quei colori, per i quali la loro differenza di cammino è un multiplo di mezza lunghezza d'onda; onde ne risulta una tinta che

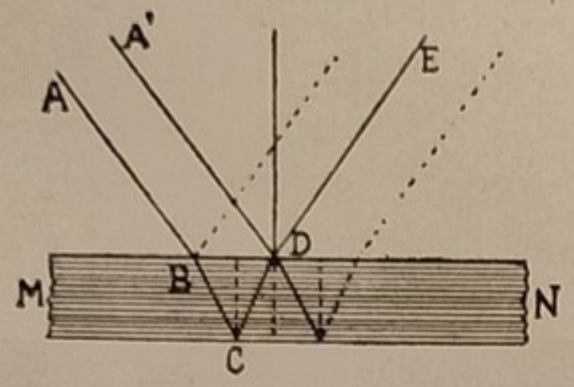


Fig. 189.

è quella che l'occhio percepisce. Questa differenza di cammino, e quindi questa tinta, dipendono evidentemente dallo spessore della lamina. Così si spiega la continua variazione di colore in una bolla di sapone, dovuta alla variazione di spessore della lamina liquida per l'evaporazione.

Così pure si spiegano le iridescenze di uno straterello sottilissimo di olio o di petrolio alla superficie dell'acqua.

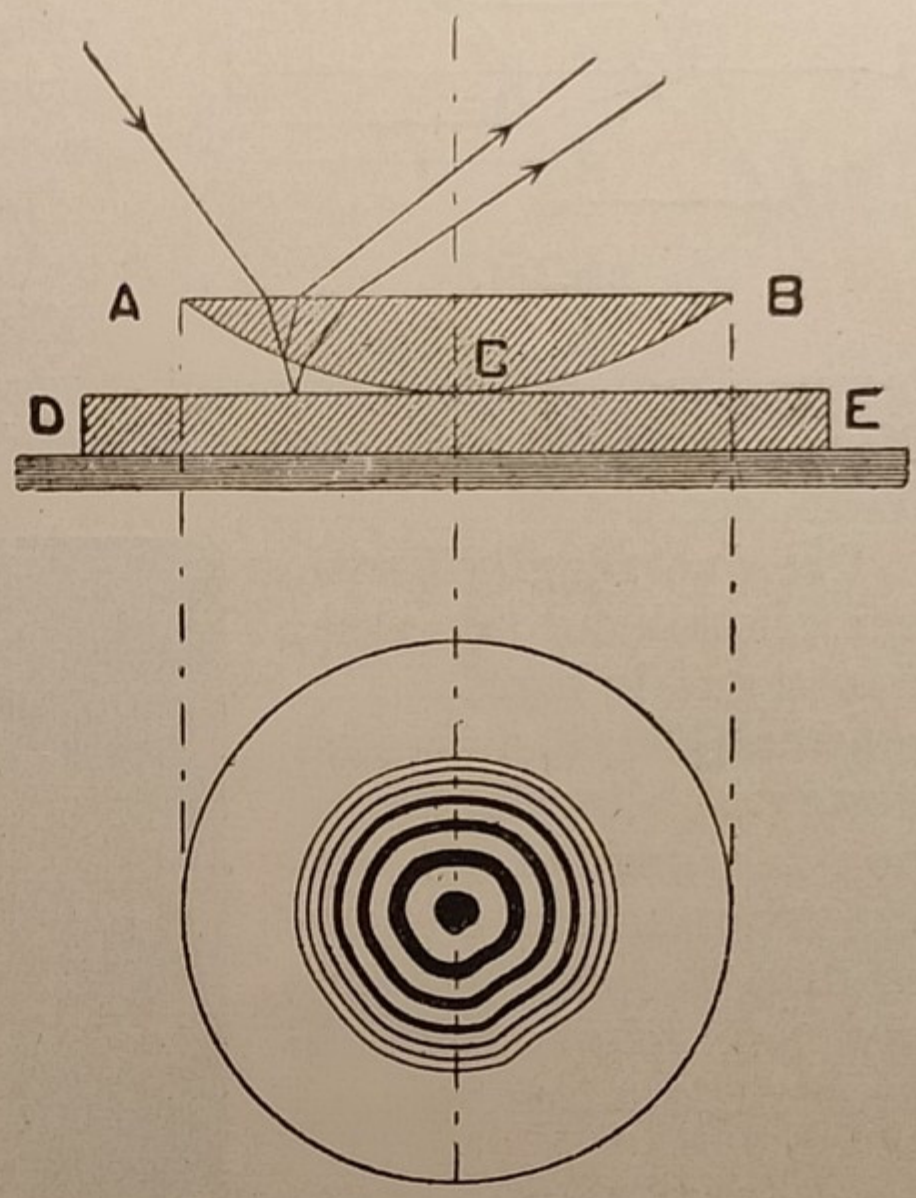


Fig. 190.

Fenomeni analoghi sono: gli anelli colorati che si osservano se un segmento sferico trasparente *ACB* (Fig. 190) si appoggia su una lastra piana *DE* pure trasparente; si vedono allora delle curve concentriche irregolari, come si vede in basso della Fig. 190, ma iridescenti se si adopera la luce bianca. Anche ora il fenomeno è dovuto all'interferenza fra un raggio riflesso sulla superficie *ACB* con un altro riflesso sulla faccia *DE*, i quali hanno percorso un cammino diverso. Questo fenomeno va sotto il nome di **anelli di Newton.**

102. **Doppia rifrazione.** — Nello studio della rifrazione vedemmo (§ 30) che ad un dato raggio incidente corrisponde un solo raggio rifratto. Ciò avviene nei mezzi non cristallizzati, come l'acqua, il vetro comune, ecc. Ma in certi corpi cristallizzati, come lo spato d'Islanda, il gesso cristallizzato, ecc., il raggio incidente *LI* si sdoppia (Fig. 191) e dà origine a due raggi rifratti, *IR* ed IR_1, in direzione diversa; onde, guardando un oggetto attraverso questi cristalli, lo si vede doppio, (Fig. 192).

Questo fenomeno, descritto la prima volta da Bartholin nel 1669, si chiama **doppia rifrazione,** e i cristalli che la presentano si dicono **birifrangenti.** Si spiega supponendo che in tali mezzi anisotropi (1) la rifrangenza sia diversa nelle diverse direzioni; cioè il moto vibratorio che costituisce

(1) Cioè aventi diversa struttura nelle diverse direzioni.

la luce, si propaga con diversa velocità nelle diverse direzioni. E poichè la deviazione del raggio rifratto dipende appunto dalla diversa velocità della luce nei due mezzi che attraversa, avviene ora una deviazione diversa in due diverse direzioni; quindi il raggio rifratto si sdoppia.

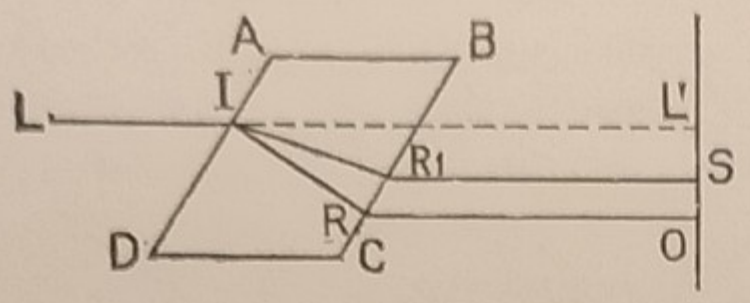


Fig. 191.

In un cristallo birifrangente vi sono una o due direzioni secondo cui non vi è doppia rifrazione, ma la rifrazione semplice a suo tempo studiata. Si chiamano *cristalli ad un asse* i primi (quarzo, spato d'Islanda, tormalina, ecc.); *cristalli a due assi* i secondi (mica, solfato di bario, ecc.).

Dei due raggi rifratti, nei cristalli ad un asse, uno segue le leggi di Descartes (§ 30) e si chiama il **raggio ordinario**; l'altro non le segue, ed è il **raggio straordinario.** Nei cristalli a due assi nessuno dei raggi rifratti segue le leggi della rifrazione.

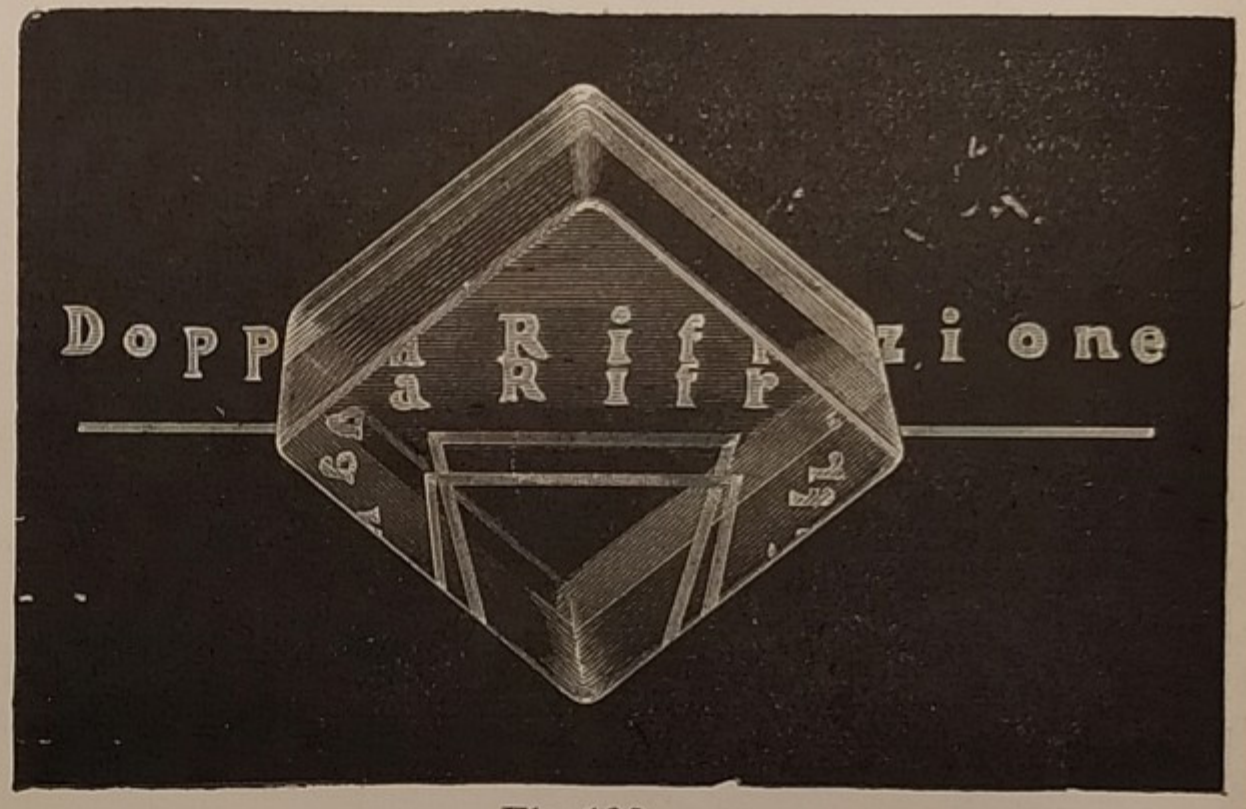


Fig. 192.

103. **Polarizzazione per riflessione.** — I raggi luminosi, dopo aver subito la riflessione o la rifrazione, risultano modificati in modo da non potere essere di nuovo riflessi o rifratti in certe direzioni (Malus [1], 1808).

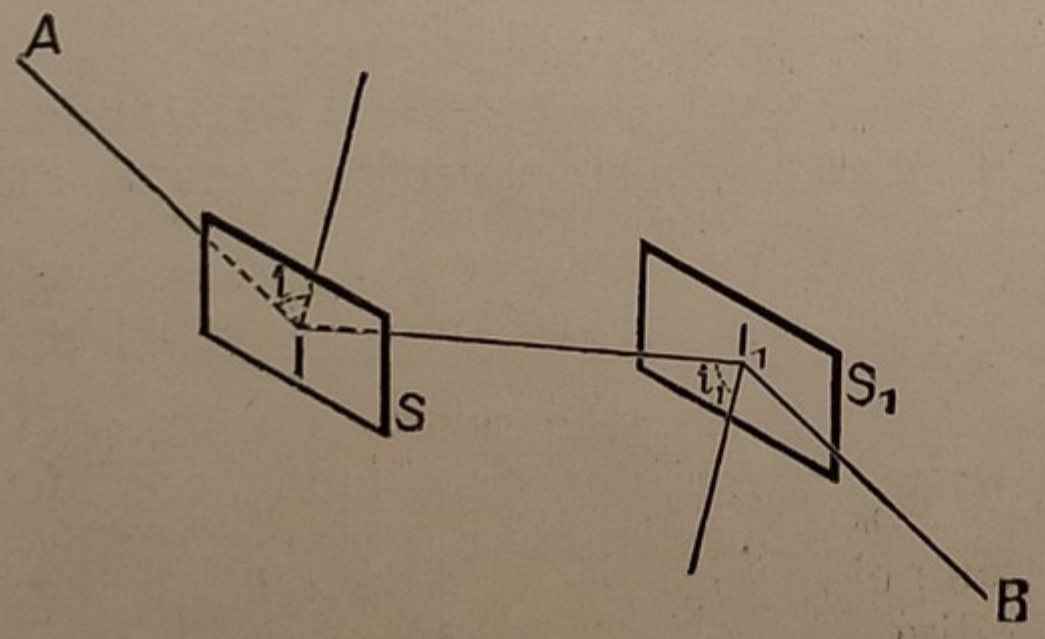


Fig. 193.

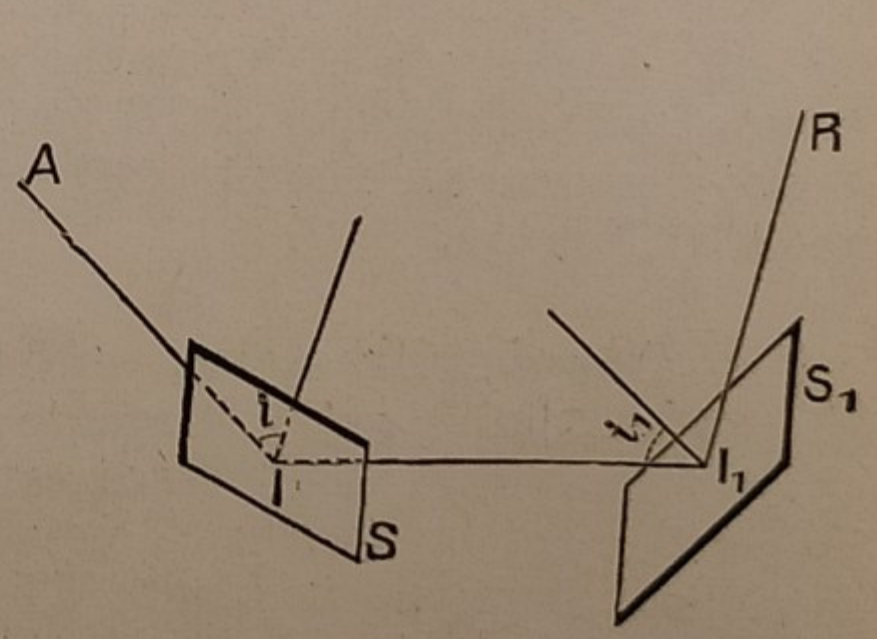


Fig. 194.

Così, ad esempio: un fascio di raggi luminosi AI cade su uno specchio S (Fig.193) e da questo è riflesso su un secondo specchio S_1, che a sua volta lo riflette nella direzione I_1R. Se i due specchi sono paralleli, o meglio, *se i due piani d'incidenza* (§ 12) AII_1 ed II_1R *coincidono* (Fig.193), *il*

(1) Malus Étienne Louis; n. a Parigi nel 1775, m. ivi nel 1812.

fascio riflesso I_1R ha la massima intensità luminosa; se invece i due specchi sono incrociati in modo che i due piani d'incidenza siano tra loro perpendicolari (Fig.194), *allora il fascio riflesso I_1R ha un'intensità minima;* che può essere anche nulla se gli specchi sono formati di lastre di vetro nero, e se l'angolo che il raggio incidente forma con lo specchio è di 35° 25′.

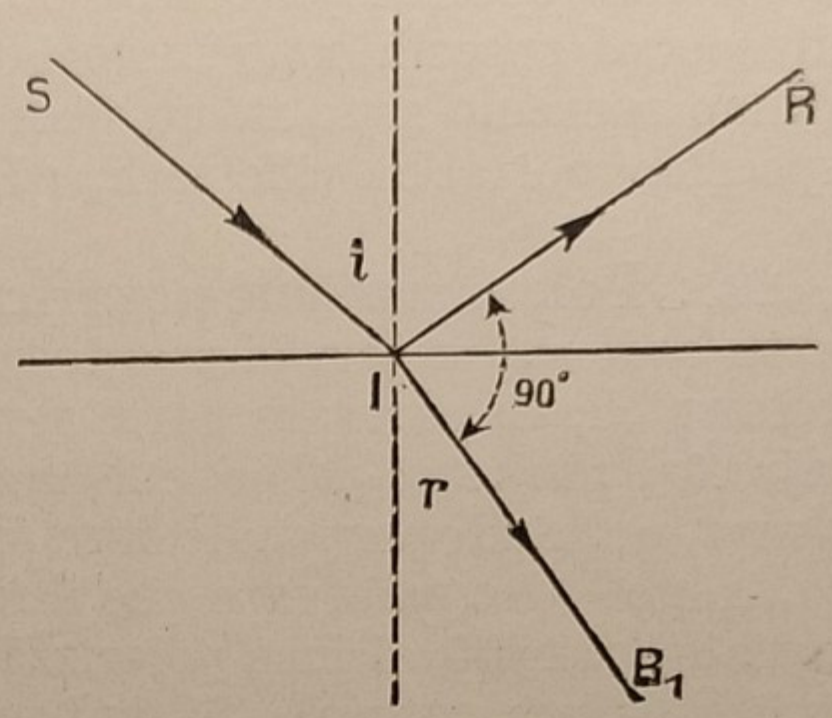


Fig. 195.

La luce II_1 riflessa dallo specchio S si dice **polarizzata** nel piano d'incidenza, e questo si chiama **il piano di polarizzazione.** Tutti i corpi possono polarizzare la luce per riflessione; ma più o meno completamente e per diversi valori dell'angolo d'incidenza i. Il marmo nero, p. es., polarizza completamente la luce; il diamante, il vetro ordinario, ecc., solo parzialmente; i metalli in minimo grado.

Si chiama **angolo di polarizzazione** di una sostanza, l'angolo che deve fare il raggio incidente con la superficie riflettente, affinchè il raggio riflesso sia polarizzato al massimo grado. Pel vetro, come si è detto, tale angolo è di 35° 25′; per l'acqua è di 37° 15′; per il diamante di 22°; ecc.

Qualunque sia la sostanza, l'angolo di polarizzazione è determinato in generale dalla seguente legge:

Legge di Brewster: *La polarizzazione della luce per riflessione sulla superficie di un corpo trasparente è totale, allorchè il raggio riflesso (IR) e il raggio rifratto (IR_1) sono tra loro perpendicolari,* (Fig.195).

104. **Come si spiega la polarizzazione.** — I fenomeni di interferenza e di diffrazione, come abbiamo visto, non possono spiegarsi che con l'ipotesi ondulatoria della luce. Ma nulla essi dicono sul modo di vibrare dell'etere nel trasmettere il moto vibratorio; cioè essi si spiegano tanto se si ammette che le vibrazioni si compiano nella direzione stessa del raggio luminoso, come avviene per le onde sonore (**vibrazioni longitudinali**), quanto se si ammette che le vibrazioni avvengano in direzione perpendicolare al raggio di propagazione, come per le onde liquide dell'acqua (**vibrazioni trasversali**).

I fenomeni di polarizzazione invece si spiegano solo ammettendo che le vibrazioni siano trasversali. Infatti, se le vibrazioni fossero longitudinali, un raggio luminoso dovrebbe avere le stesse proprietà in qualunque piano passante per esso; e non potrebbe più spiegarsi il diverso comportamento della luce polarizzata rispetto al piano di polarizzazione o ad un piano a questo perpendicolare.

Queste differenze possono solo spiegarsi ammettendo, che in un raggio di luce ordinaria le vibrazioni dei punti dell'etere avvengano in tutte le direzioni in ogni piano perpendicolare al raggio; mentre in un raggio di luce polarizzata le vibrazioni si riducono a quelle esistenti in un solo piano contenente il raggio, e precisamente in un piano perpendicolare a quello di polarizzazione.

In altre parole, uno specchio riflette solo i moti vibratori che avvengono perpendicolarmente al piano d'incidenza, ed estingue gli altri. Se quindi i piani d'incidenza dei due specchi coincidono (1° caso), i moti vibratori trasmessi dal primo specchio, sono proprio quelli che è capace di riflettere il secondo specchio, ed il fascio riflesso I_1R ha il massimo d'intensità. Se invece gli specchi sono incrociati (2° caso), i moti vibratori trasmessi dal primo specchio sono in un piano perpendicolare a quello in cui il secondo specchio potrebbe rifletterli, ed il fascio riflesso I_1R è estinto.

105. **Polarizzazione per rifrazione.** — Se un raggio di luce non polarizzata cade sopra una lastra di vetro sotto l'angolo di polarizzazione, non è riflesso che in parte; in parte si rifrange attraversando la lastra, ed *il raggio rifratto è pure esso polarizzato, ma in un piano perpendicolare al piano di incidenza*, e quindi perpendicolare al piano di polarizzazione del raggio riflesso.

Arago [1] ha osservato che il fascio riflesso ed il fascio rifratto contengono eguale quantità di luce polarizzata, e che l'insieme di questi due fasci costituisce la luce naturale. Si può considerare cioè la luce ordinaria come costituita di due fasci eguali, polarizzati ad angolo retto.

Siccome una sola lastra di vetro non polarizza completamente la luce, si usa frequentemente, per ottenere luce polarizzata, *una pila di lamine di vetro* sovrapposte.

La luce si polarizza anche per doppia rifrazione, quando attraversa una sostanza birifrangente, ad es., un cristallo di spato d'Islanda. Tanto il raggio ordinario che quello straordinario sono polarizzati, ma *in piani perpendicolari fra loro.*

106. **Polariscopio - Prisma di Nicol.** — Si chiama *polariscopio* od *analizzatore* uno strumento che serve a riconoscere se la luce è polarizzata ed in che piano.

L'analizzatore più adoperato è il **prisma di Nicol** [2], chiamato più semplicemente il **nicol.** Esso è costituito da un romboedro di spato d'Islanda, tagliato in due parti con un piano $AOA'H$ (Fig.196) passante per i vertici A ed A' dei due angoloidi ottusi e perpendicolare al piano diagonale $ACA'C'$; quest'ultimo parallelogrammo si chiama la **sezione principale** del prisma. Le due metà si incollano nuovamente con balsamo del Canadà. Il nicol in sezione è rappresentato dalla Fig.197.

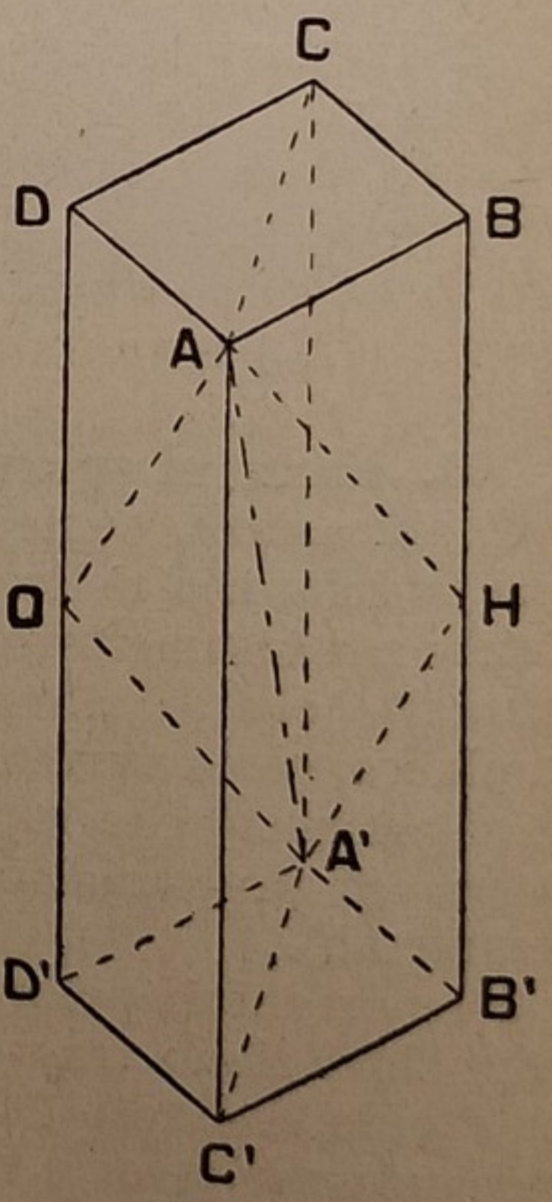


Fig. 196.

Un raggio di luce SI entrando in I nel prisma si rifrange e si sdoppia; il raggio ordinario ID più deviato, cade in D con un angolo d'incidenza maggiore dell'angolo limite e si riflette totalmente (§ 34) secondo DEF; ed è così eliminato.

---

(1) Arago Francesco, fisico ed astronomo insigne; n. ad Astagel (Pirenei) nel 1786, m. a Parigi nel 1852.

(2) Nicol James; n. a Tourquair nel 1810, m. ad Aberdeen nel 1879.

Il raggio straordinario IC prosegue invece secondo CI' ed esce nella direzione $I'R$; è questo il raggio utilizzato, *polarizzato completamente in un piano perpendicolare alla sezione principale.*

Se un secondo nicol P_2 riceve i raggi che hanno attraversato un primo nicol P_1, attraverso P_2 si vedrà luce se i due prismi hanno le sezioni principali parallele; si estinguerà invece la luce se i due prismi hanno le sezioni principali perpendicolari; cioè sono, come si dice, *incrociati*. Il primo nicol si chiama **polarizzatore**, il secondo **analizzatore.**

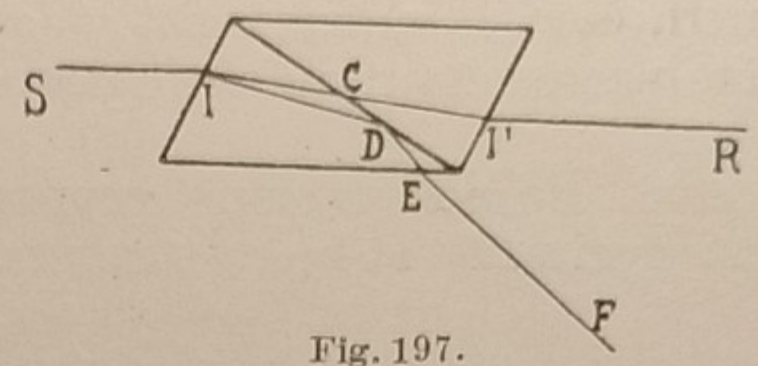


Fig. 197.

Un polariscopio semplice può formarsi con due lamine di cristallo di *tormalina*, tagliate parallelamente all'asse del cristallo, ed incastrate ciascuna in un disco di ottone M. Questi due dischi, forati al centro ove è la tormalina, sono montati in anelli di metallo, formando una specie di pinza (Fig. 198), che si chiama appunto **pinzetta a tormaline.**

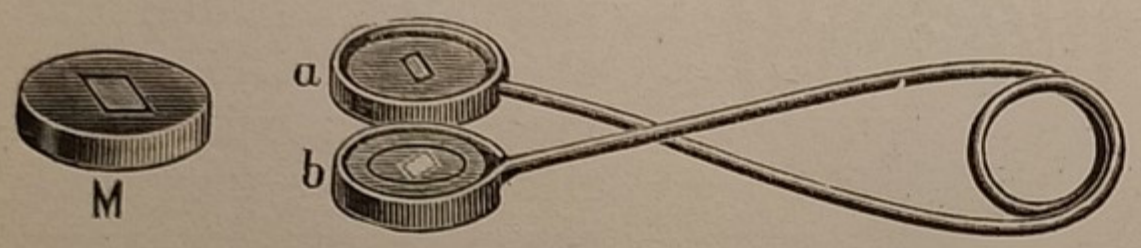


Fig. 198.

La tormalina è birifrangente; ma se la lamina è dello spessore di almeno 1 mm, non essendo ben trasparente, assorbe ed estingue interamente il raggio ordinario; mentre esce il raggio straordinario, che è polarizzato. Anche il raggio straordinario è però assorbito in parte; onde la luce che attraversa la tormalina appare colorata in verde.

I due dischi con le tormaline, ruotando, possono disporsi in modo che le tormaline siano o con gli assi paralleli o perpendicolari, nel secondo caso sono all'estinzione.

107. **Polarizzazione rotatoria.** — Se fra i due nicol incrociati, cioè posti all'estinzione, si pone una lamina di quarzo tagliata perpendicolarmente all'asse di cristallizzazione, attraverso il secondo nicol si ritorna a veder la luce. Facendo ruotare il secondo nicol di un certo angolo, si ritorna nuovamente ad estinguere la luce. Quindi la lamina di quarzo ha fatto ruotare di un certo angolo il piano di polarizzazione del raggio trasmesso dal primo nicol. Munendo il secondo nicol di un cerchio graduato, si può misurare l'angolo di rotazione di detto piano di polarizzazione.

Il fenomeno si chiama **polarizzazione rotatoria,** ed è stato scoperto da Arago; l'angolo di rotazione dipende dalla natura della sostanza e dal suo spessore; varia anche col colore della luce impiegata.

Si utilizza questo fenomeno come mezzo di analisi di alcune sostanze. Così lo zucchero di canna sciolto nell'acqua, la soluzione alcoolica di canfora, l'acido tartarico, ecc., fanno ruotare nel senso positivo (cioè secondo le lancette dell'orologio) rispetto all'osservatore, il piano di polarizzazione; e si chiamano perciò **destrogire.** L'essenza di trementina, la gomma arabica, ecc., lo fanno ruotare invece nel senso negativo, e si chiamano **levogire.** Sostanze di eguale composizione chimica hanno diverso potere rota-

torio, secondo la provenienza; così il glucosio (zucchero d'uva) è levogiro, mentre il saccarosio (zucchero di canna) è destrogiro.

Si costruiscono appunto strumenti fondati sui principi esposti, impiegati per l'analisi di alcune sostanze; essi si chiamano **polarimetri, saccarimetri,** ecc. I mineralogisti adoperano frequentemente le pinzette a tormaline per osservare e riconoscere alcuni cristalli.

108. **Polarizzazione cromatica.** — Anche i raggi polarizzati possono interferire. Se la luce attraversa un cristallo birifrangente, i due raggi provenienti dallo sdoppiamento del raggio incidente non proseguono nel cristallo con la medesima velocità (§ 102). All'uscita essi quindi possono interferire. L'osservazione si può fare ponendo tra le due branche della pinzetta a tormaline, un cristallo birifrangente; guardando con l'occhio attraverso le due tormaline si vedono figure come la Fig. 199 se il cristallo interposto è ad un asse; e come la Fig. 200 se è a due assi. Gli anelli sono di una tinta sola, se la luce impiegata è monocromatica; sono invece iridescenti con la luce bianca.

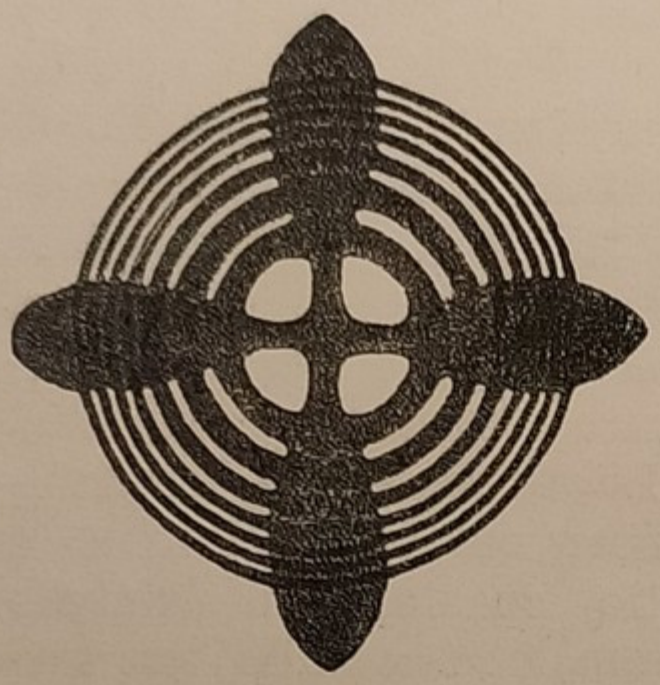


Fig. 199.

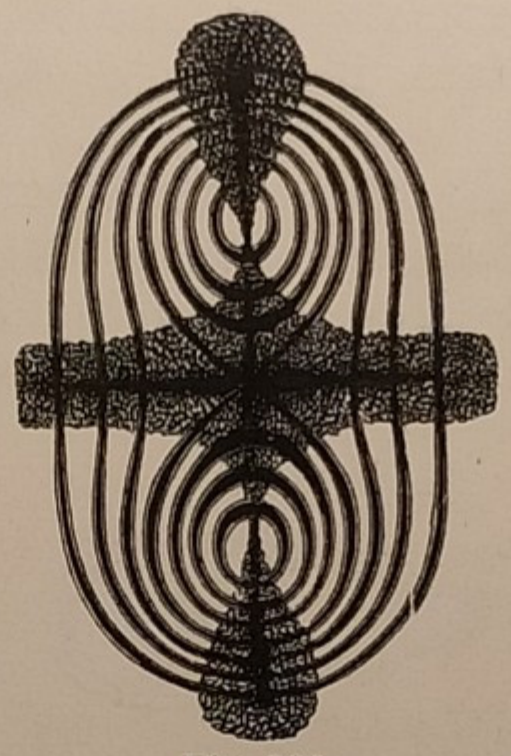


Fig. 200.

Fenomeni analoghi presentano il vetro temperato, il vetro compresso, ecc.; essi sono compresi sotto il nome di **polarizzazione cromatica.**

Problemi da risolvere.

1. Calcolare la lunghezza d'onda dell'estremo rosso e dell'estremo violetto, nell'acqua e nel flint.

2. Sapendo che la lunghezza d'onda del giallo (medio) in un dato mezzo è 0,37 μ, calcolare l'indice di rifrazione relativo all'aria.

3. Riferendosi alla Fig. 183, calcolare la distanza dei due punti O' ed O'' perchè a cm. 50 di distanza si formino le frange centrali alla distanza di mm. 2, per luce la cui lunghezza d'onda è $\lambda = 0{,}50\,\mu$.

Spettroscopia.

109. **Spettro puro.** — È di grande utilità lo studio delle radiazioni che compongono la luce composta di una data sorgente luminosa. Ciò si fa scomponendo detta luce per mezzo di un prisma, ed ottenendone il relativo **spettro luminoso** (§ 43).

Ora, se su un prisma P (Fig. 201) viene luce da un corpo luminoso esteso L, emergeranno nella direzione I_1R un raggio, ad es., giallo proveniente dalla scomposizione di AI, ed uno rosso proveniente da BI, ed I_1R risulterà

composto e non monocromatico. Parimenti, se i raggi cadono sul prisma da un punto A a distanza finita (Fig. 202), usciranno ancora secondo I_1R un raggio, ad es., giallo proveniente da AI, ed uno rosso proveniente da AI'; ed I_1R sarà ancora di luce composta.

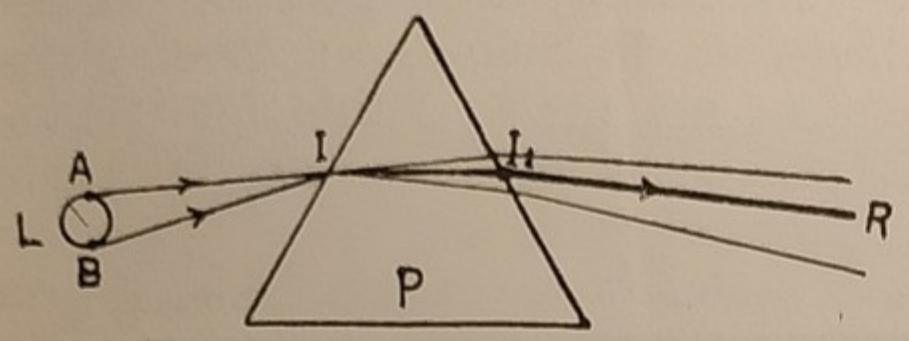


Fig. 201.

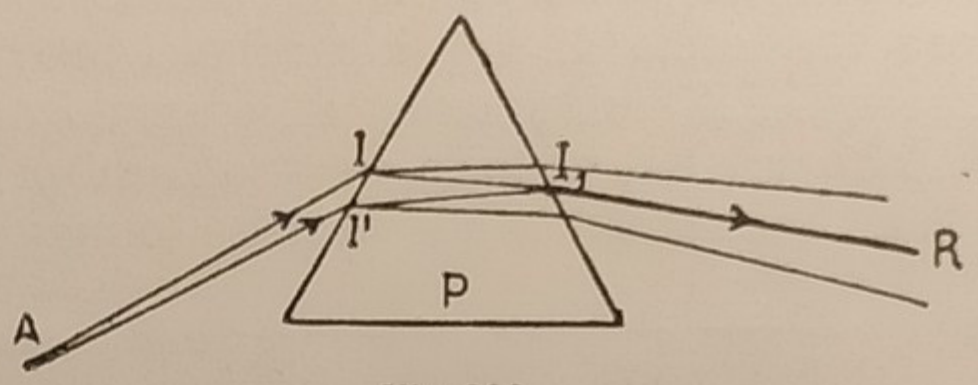


Fig. 202.

I vari raggi colorati emergenti dal prisma saranno distinti e separati uno dall'altro, cioè si avrà uno **spettro puro,** se il punto A è a distanza infinita; cioè se cade sul prisma un fascio di raggi paralleli. Anzichè un punto luminoso è più conveniente in pratica usare un segmento luminoso; quindi, concludendo, per ottenere uno spettro puro, occorre che: *la sorgente luminosa sia un segmento parallelo agli spigoli del prisma, posto a distanza infinita.*

110. **Spettroscopio.** — La condizione suddetta si ottiene praticamente con un apparecchio chiamato lo **spettroscopio.** Quello di Bunsen è costituito da un tubo FC, detto il **collimatore,** chiuso ad un'estremità da un diaframma F a forma di fenditura strettissima, la cui larghezza si può variare manovrando una vite; essa si illumina con la sorgente luminosa L da esaminare, (Fig. 203). Questa fenditura è posta nel piano focale di una lente convergente C; i raggi provenienti da L arrivano alla lente come se provenissero dalla fenditura, cioè come se questa fosse un segmento luminoso; ed escono dalla lente secondo un fascio di raggi paralleli (§ 49 - N. 5); attraversano poi un prisma P che li devia e li scompone.

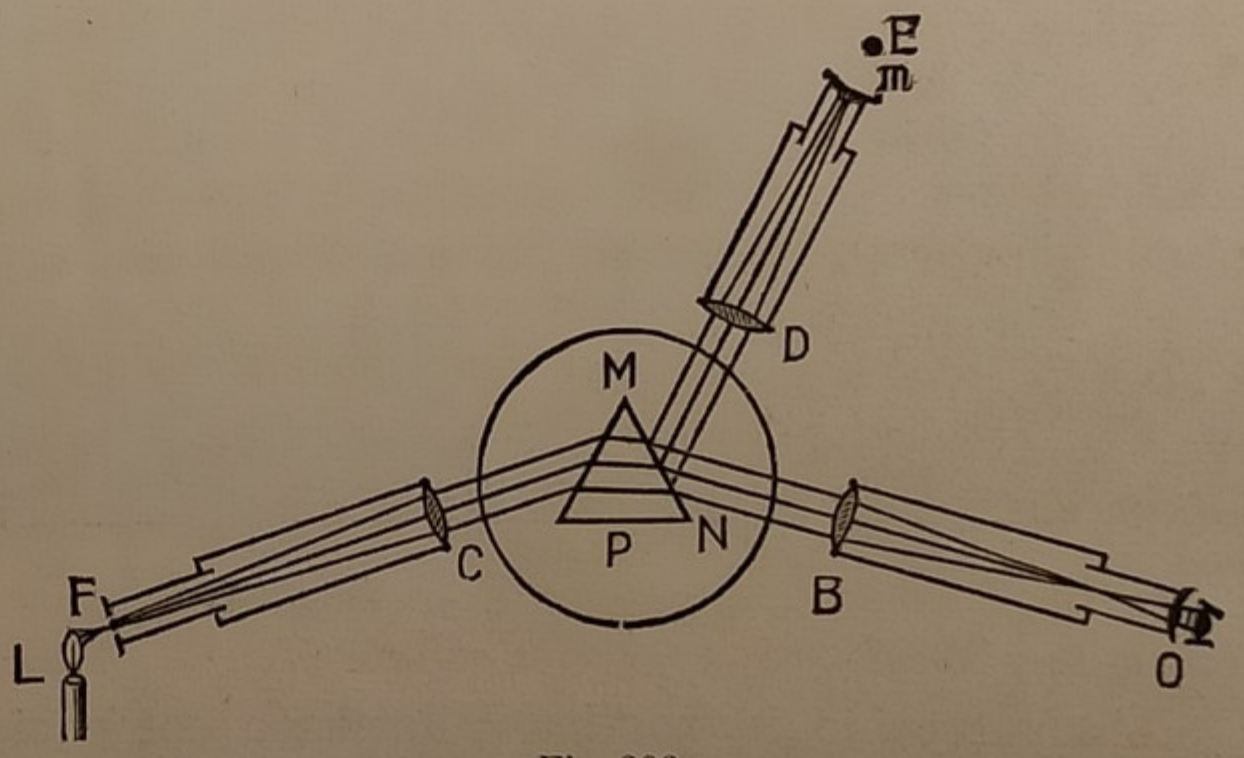


Fig. 203.

I raggi emergenti non si raccolgono su uno schermo, poichè lo spettro così osservato per diffusione dallo schermo, sarebbe poco luminoso; nè si raccolgono direttamente con l'occhio, poichè la pupilla essendo piccola non potrebbe contenerli tutti. Sono raccolti invece da un cannocchiale astronomico B_1O; guardando in O si osserva lo spettro fornito dal prisma.

Se la fenditura F è parallela agli spigoli del prisma, i raggi cadono su questo nelle condizioni volute per formare uno spettro puro.

Per confrontare la posizione dei colori nei varî spettri, è necessario riferirli ad una graduazione; questa si ottiene per mezzo di una **scala micrometrica** *m*, formata da una divisione finissima (ad es., un centimetro diviso in 100 parti), su una lastrina di vetro, illuminata da una candela *E*, e situata nel piano focale di una lente convergente *D*; da questa esce anche ora un fascio di raggi paralleli, provenienti da *m*, che si riflettono sulla faccia *MN* del prisma, ed entrano anch'essi nel cannocchiale *BO*. Guardando in *O* si vede lo spettro fornito dal prisma, e sotto ad esso una divisione millimetrata, dovuta all'immagine ingrandita di *m*.

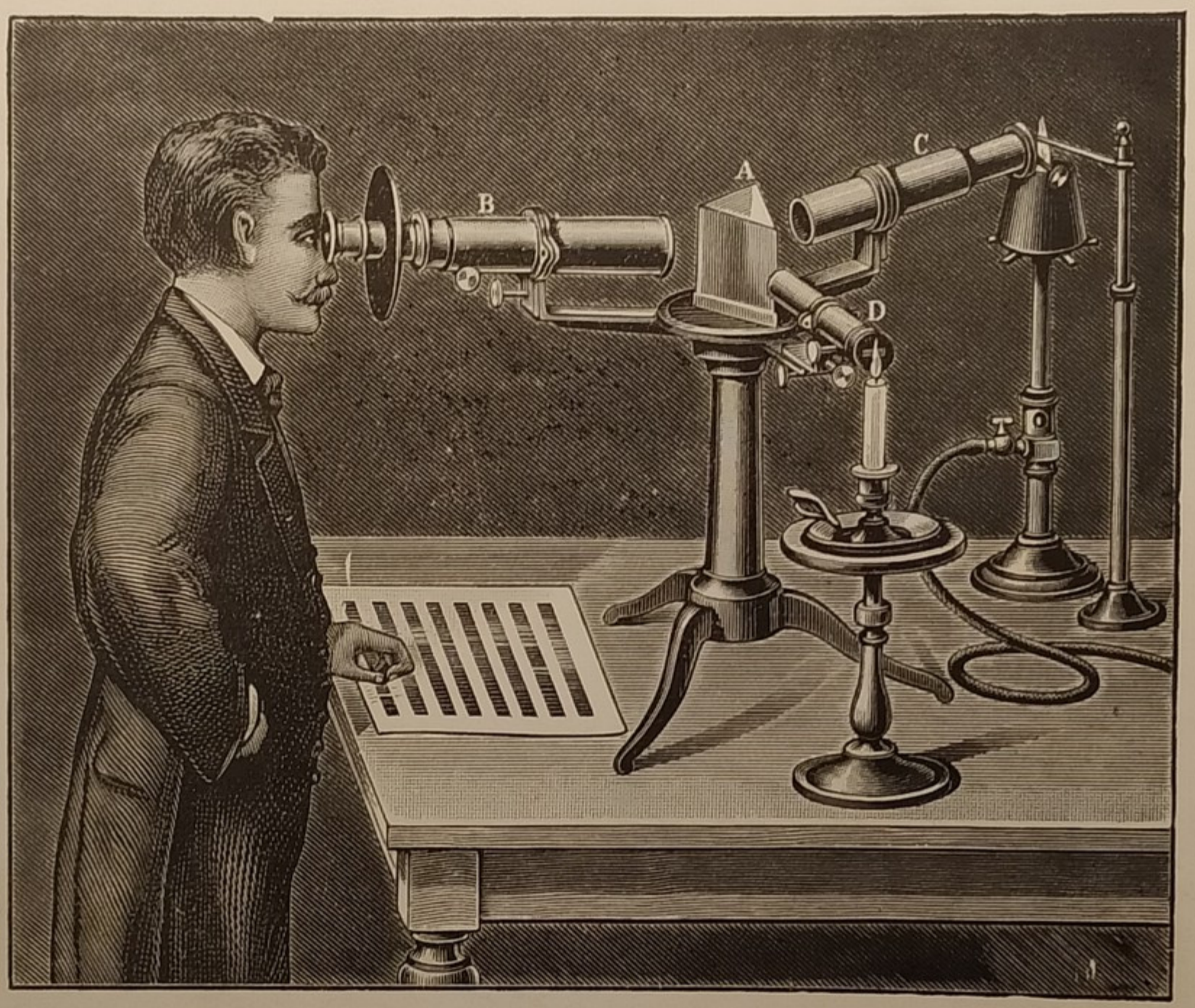


Fig. 204.

L'apparecchio in pratica è formato come si vede nella Fig. 204; *C* è il collimatore, avanti a cui è posta la fiamma da esaminare; *D* è il micrometro, *B* il cannocchiale per l'osservazione; tutti e tre possono ruotare attorno ad un asse verticale passante per il centro delle basi del prisma *A*.

111. **Spettri di emissione.** — Gli spettri osservati mettendo avanti alla fenditura dello spettroscopio le varie sorgenti luminose, si chiamano gli **spettri di emissione** di tali sorgenti. Essi sono di due categorie:

1. **Spettri continui,** nei quali i colori si succedono senza interruzione visibile, cioè senza spazi oscuri intercalati fra di essi. *Dànno spettro continuo i solidi ed i liquidi incandescenti.* Le fiamme del gas, dell'acetilene, ecc., dànno spettro continuo, perchè la loro luce è dovuta a particelle di carbonio *solido* incandescente, derivante dalla scomposizione dell'idrocarburo che

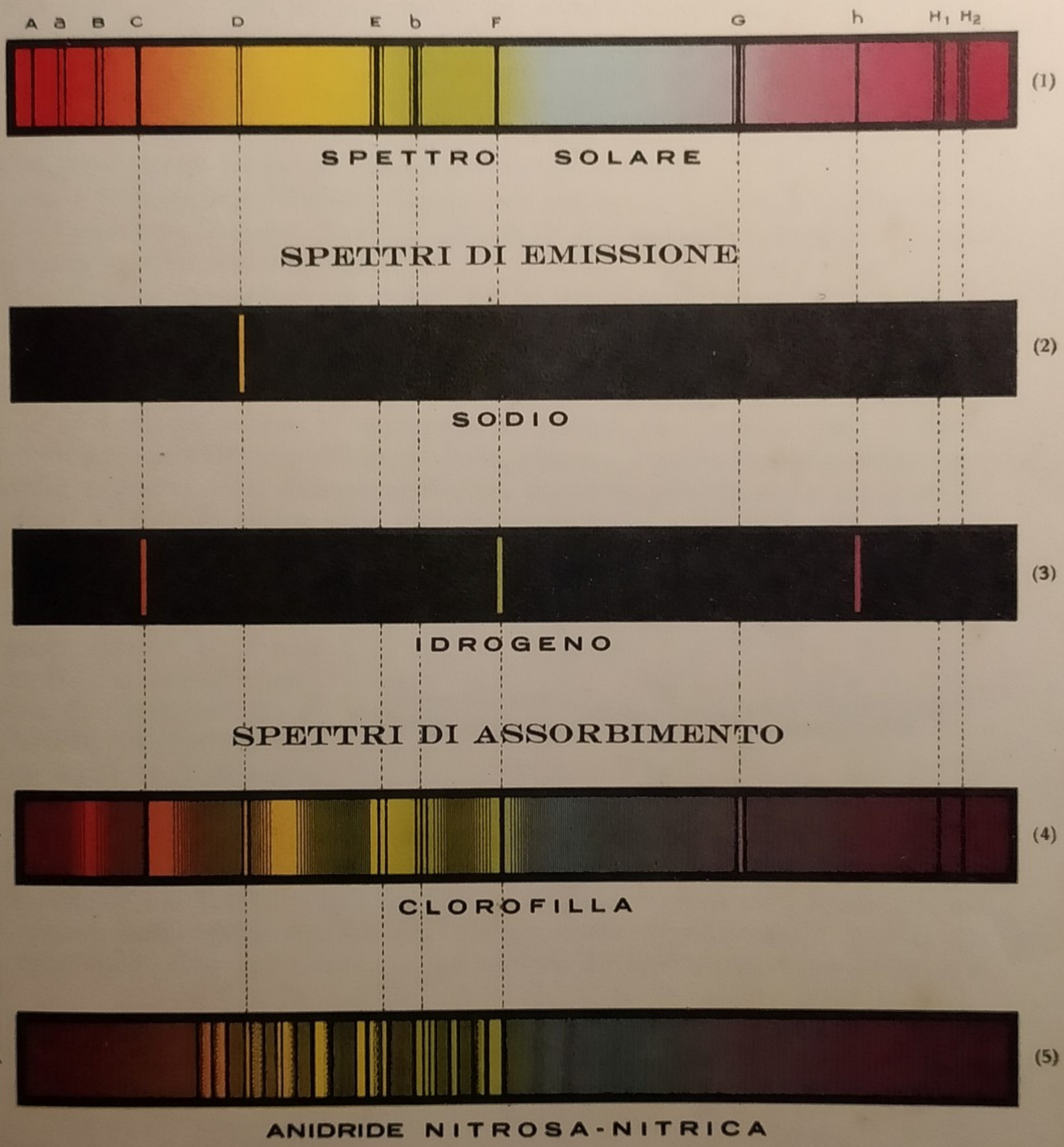

A a B C D E b F G h H1 H2
(1)
SPETTRO SOLARE
SPETTRI DI EMISSIONE
(2)
SODIO
(3)
IDROGENO
SPETTRI DI ASSORBIMENTO
(4)
CLOROFILLA
(5)
ANIDRIDE NITROSA-NITRICA

Fig. 205.

alimenta la fiamma; com'è noto, la presenza del carbonio libero è provata dal nero fumo che si deposita su un piatto freddo lambito dalla fiamma.

I varî spettri continui differiscono fra loro per la diversa intensità dei colori che li compongono.

2. **Spettri discontinui** sono quelli in cui i varî colori sono interrotti da spazi oscuri; *sono formati dai gas e dai vapori incandescenti.*

Nello spettro ottenuto coi gas e vapori incandescenti, la cui molecola è monoatomica, gli spazi oscuri occupano quasi tutto lo spettro, che è ridotto a poche righe brillanti di diverso colore, sottili, parallele, disseminate qua e là nel campo dello spettro. La Fig. 205 mostra alcuni di questi spettri, che per la forma si chiamano **spettri a righe.**

I gas e i vapori poliatomici forniscono invece uno spettro costituito da strisce luminose sfumate (**bande**), alternate con strisce oscure; in tal caso si chiama **spettro a colonnato.**

Per ottenere lo spettro di emissione di un vapore, p. es. del vapore di sodio, si pone avanti la fenditura dello spettroscopio la fiamma di un becco Bunsen, che non dà luce; indi si pone nella fiamma un filo di platino piegato in cima ad occhiello, che sostiene qualche granello di sale da cucina. Il sale (*Na Cl*) col calore si scompone in sodio (*Na*) e cloro (*Cl*); il cloro, che è un gas, non dà sensibilmente luce, mentre il sodio illumina la fiamma di giallo, come si vede direttamente con l'occhio; guardando nello spettroscopio si vede comparire una riga brillante nel giallo (Fig. 205 - 2), alla quale è ridotto lo spettro di emissione del sodio [1].

Per ottenere lo spettro di emissione di un gas, si adopera un *tubo di Plücker* [2], formato da un tubo capillare *T* di vetro (Fig. 206), con due rigonfiamenti *A* e *B* alle estremità; a questi sono saldati due *elettrodi E - F* di platino. Nel tubo è racchiuso il gas da esaminare, rarefatto alla pressione di qualche millimetro di mercurio (Vol. 1° - § 187); sotto l'azione di una scarica elettrica (come studieremo meglio nel § 204), il tubo s'illumina, specialmente nel tratto capillare, che si dispone avanti alla fenditura del collimatore dello spettroscopio. La luce prodotta dipende dalla qualità del gas racchiuso, e lo spettroscopio ne mostra lo spettro suo particolare.

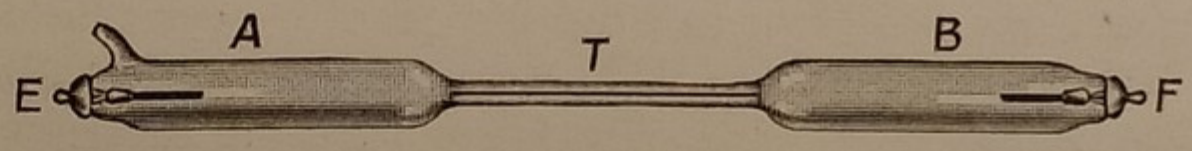


Fig. 206.

112. **Analisi spettrale.** — Il numero e la posizione delle righe nello spettro di emissione, varia da sostanza a sostanza; ogni elemento chimico ha pertanto un suo caratteristico spettro di emissione. La Fig. 205 mostra gli spettri di emissione del *sodio* (2) e dell'*idrogeno* (3).

Onde, dall'esame delle righe, si può riconoscere quale è la sostanza che le produce. Si ha in tal modo un mezzo di analisi chimica, la cui importanza sta principalmente nella sua estrema sensibilità. Basta infatti un centomilionesimo di milligrammo di sodio nella fiamma del becco Bunsen, per veder comparire nello spettroscopio la riga gialla caratteristica del sodio.

---

(1) La riga del sodio è in realtà formata da due righe molto vicine.
(2) Plücker Julius; n. ad Angers nel 1755, m. ivi nel 1826.

Tanto che è quasi impossibile che tale riga non si osservi in ogni caso; bastando che nella fiamma del becco Bunsen cada una particella di pulviscolo dell'aria, che contiene tracce di sodio, per vedere comparire la riga di questo elemento.

È con l'analisi spettrale che sono state scoperte tutte le sostanze rarissime ora conosciute; ad es. il *tallio* da Crookes, l'*indio* da Richet, l'*elio* da Ramsay, ecc.

113. **Analisi degli astri.** — Concentrando con una lente sulla fenditura dello spettroscopio i raggi provenienti da un astro, se ne analizza la luce emanata; ciò può fornire il mezzo di riconoscere le sostanze di cui esso è formato. Così si può assicurare che alcuni dei corpi a noi ben noti, come ad es., il magnesio ed il ferro, fanno parte di molte stelle del firmamento.

Esaminando la luce delle nebulose, si è riscontrato che alcune di esse dànno uno spettro continuo: ciò prova che sono ammassi di corpi solidi incandescenti, cioè di stelle che forniscono luce come un corpo unico esteso luminoso, per la loro vicinanza. Altre dànno uno spettro discontinuo, cioè sono dei vapori incandescenti, fra cui specialmente l'idrogeno, l'elio, ed un gas a noi ignoto, che fu chiamato *nebulium*.

Così, l'esame della luce emanata dalle protuberanze che si osservano sul Sole durante un'eclissi totale, ci mostra distintissime le righe dell'idrogeno; onde possiamo asserire che quelle protuberanze non sono che enormi fiammate di idrogeno.

Lo spettroscopio ci permette di risolvere un altro elegante problema dell'astronomia. Com'è noto, le stelle ci sembrano *fisse* nel cielo, per la loro enorme distanza; mentre esse in realtà, come il nostro Sole, si muovono nello spazio. Ora, in qualche caso, è possibile decidere se una stella si allontana o si avvicina alla Terra, e con quale velocità. Per comprendere come ciò possa avvenire, riferiamoci ad un'analogia dei suoni.

Se, essendo noi fermi vicino ad una strada ferrata, ci passa avanti un treno che fischia, osserviamo nettamente un cambiamento nel tono del fischio; che è più acuto quando la locomotiva si avvicina a noi, e diventa più grave appena essa è passata.

Questo fatto, che si chiama il **principio di Döppler** [1] (Vol. 1° - § 368) si spiega facilmente; quando la locomotiva si avvicina a noi, la velocità del suono si somma con quella del treno, per cui al nostro orecchio arriva in ciascun minuto secondo un maggior numero di onde sonore; cioè percepiamo un suono di maggior numero di vibrazioni e quindi più acuto. Quando la locomotiva si allontana, diminuisce il numero delle onde che arrivano ad ogni secondo all'orecchio, e il suono si percepisce più basso.

Traducendo questo concetto per la luce, si ha che se un corpo luminoso (una stella) si avvicina alla Terra, deve aumentare la frequenza delle onde luminose che arrivano al nostro occhio; cioè vedremo spostate di qualche frazione di millimetro verso il violetto le righe dello spettro di tale stella; se essa invece si allontana dalla Terra, le righe si vedranno spostate verso il rosso. Dall'entità di questo spostamento, si può calcolare la velocità con

---

(1) Döppler Christain, fisico dell'Università di Vienna; n. a Salzburg nle 1803, m. a Venezia nel 1853.

cui si muove l'astro. Così dallo spostamento della riga F (§ 115) dello spettro di Sirio, si è potuto calcolare che questa stella si allontana dal Sole con la velocità di 47 km. al secondo.

Questi cenni ci dànno un'idea del modo con cui riusciamo a rispondere a tanti quesiti dell'astronomia sull'essenza dei varî mondi; onde vediamo come sia la stessa luce che ci arriva dopo secoli dagli astri immensamente lontani, che ci rivela i secreti della loro costituzione.

114. **Spettri di assorbimento.** — Poniamo avanti alla fenditura dello spettroscopio una sorgente luminosa che fornisca uno spettro continuo; poi interponiamo fra tale sorgente e la fenditura una sostanza trasparente. Poichè nessuna sostanza è perfettamente trasparente, la sostanza interposta *assorbe* parte della luce emessa dalla sorgente.

Ma tale assorbimento non è complessivo per tutti i colori della sorgente, il che si tradurrebbe in un parziale oscuramento di tutto lo spettro della sorgente; ma è *selettivo*, cioè vengono assorbiti solo alcuni dei colori e gli altri no. Pertanto nello spettro della sorgente si vedranno comparire qua e là alcune righe o bande oscure, in corrispondenza dei colori assorbiti; l'insieme di tali righe e bande, costituisce lo **spettro di assorbimento** della sostanza interposta tra la sorgente e la fenditura.

Anche lo spettro di assorbimento varia da sostanza a sostanza, come mostrano gli ultimi esempi della Fig. 205: *clorofilla* (4), *anidride nitrosa-nitrica* (5). L'esame di questi spettri può fornire anch'esso un metodo di analisi chimica, pure sensibilissima. L'importanza di questo nuovo metodo di analisi sta nel fatto che la sostanza adoperata può essere a temperatura ordinaria. Abbiamo così il mezzo di esaminare i corpi composti; mentre con lo spettro di emissione, dovendo scomporre la sostanza esaminata, come si è detto, si ha principalmente l'analisi dei corpi semplici.

Così, ad es., lo spettro di assorbimento del sangue è caratteristico di tale sostanza, e non confondibile con quello di qualunque altra sostanza rossa; onde basta l'analisi di una goccia di liquido, ottenuta magari umettando una macchia sospetta su una stoffa, per decidere se è di sangue o di altra sostanza.

L'esperienza ha inoltre dimostrato che esiste una coincidenza di posizione tra le righe oscure di assorbimento dello spettro di un aeriforme e le righe brillanti che lo stesso corpo fornisce, allorchè portato all'incandescenza dà uno spettro di emissione. Cioè per la stessa sostanza lo spettro di assorbimento è l'inverso di quello di emissione; e si enuncia il seguente principio detto **principio di Kirchhoff** [1], per l'inversione dello spettro:

Un vapore o un gas incandescente emette quelle radiazioni ch'esso è capace di assorbire, quando funziona come mezzo assorbente a temperatura inferiore di quella della sorgente luminosa, che produce uno spettro continuo.

115. **Spettro del Sole - Righe di Fraunhofer.** — Se sulla fenditura dello spettroscopio si fa cadere la luce del Sole, lo spettro ottenuto è quello solare. Si osserva che esso è solcato trasversalmente da molte righe oscure,

---

(1) Kirchhoff Gustav Robert, fisico tedesco; n. a Königsberg nel 1824, m. a Berlino nel 1887.

scoperte la prima volta da Wollaston nel 1802, ma studiate meglio da Fraunhofer [1] nel 1816, e che si chiamano perciò col nome di questi (Fig. 205 - 1). Il Fraunhofer designò le otto più importanti con le prime lettere dell'alfabeto; la riga *A* è nel rosso, la *D* nel giallo, la *H* nel violetto.

La seguente Tabella indica le lunghezze d'onda corrispondenti alle varie righe di Fraunhofer:

	A	*B*	*C*	*D*	*E*	*F*	*G*	*H*	
$\lambda =$	0,760	0,687	0,656	0,589	0,527	0,486	0,431	0,396	μ

Più tardi, con migliori mezzi di dispersione, si contarono parecchie migliaia di tali righe [2]; la riga *D* si trova nella stessa posizione in cui si forma la riga gialla del sodio.

Poichè si ritiene che il Sole sia un liquido incandescente, esso deve fornire uno spettro continuo; l'esistenza di queste righe oscure deve adunque spiegarsi con l'assorbimento dei colori corrispondenti, dovuto a sostanze interposte fra il nucleo incandescente del Sole (*fotosfera*) e lo spettroscopio.

Tali sostanze sono o sul Sole, e costituiscono l'atmosfera solare (*cromosfera*), o nell'atmosfera terrestre.

Esaminando le righe di Fraunhofer a livello del mare e poi su un'alta montagna, alcune di esse spariscono o si affievoliscono; esse sono certamente dovute all'assorbimento dell'atmosfera terrestre, e si chiamano appunto **righe telluriche.** Le altre che rimangono sono dovute specialmente all'assorbimento dell'atmosfera solare. E poichè formano uno spettro di assorbimento, dal loro esame si può dedurre quali sono le sostanze che allo stato di vapore sono contenute sul Sole. Così si può asserire che sul Sole esiste il *ferro* (a cui sono dovute le righe *E* e *G*), il *sodio* (per la riga *D*), il *calcio* (per le righe *H*), il *magnesio* (per la riga *B*), l'*ossigeno*, ecc.; e si è riscontrata pure l'esistenza dell'*elio*, gas rarissimo nell'atmosfera terrestre, ma abbondante sul Sole, a cui deve appunto il suo nome.

Esaminando la luce dei pianeti si osserva uno spettro eguale a quello solare; ma in qualche caso si vedono comparire alcune righe oscure in più (come in Marte e in Giove), dovute ad altri gas, specialmente a vapore d'acqua, esistenti su tali pianeti. Tali righe non si vedono nello spettro della Luna; ciò conferma l'ipotesi che il nostro satellite sia sprovvisto di atmosfera, e quindi inabitata.

Questi risultati sulla costituzione dell'Universo sono davvero meravigliosi; si può affermare che la scoperta dell'analisi spettrale ha completamente rinnovata la scienza; e la sua influenza sulla filosofia naturale non ha importanza minore di quanto ebbero a suo tempo le maggiori scoperte di Keplero e di Newton. Errava Augusto Comte, il patriarca del Positivismo, allorchè nel 1852, affermava l'impossibilità di riconoscere la composizione chimica degli astri e giudicava *vani e oziosi* i tentativi a ciò rivolti.

---

(1) Fraunhofer Joseph, fisico a Monaco; n. a Straubing nel 1787, m. a Monaco nel 1826.

(2) Per mezzo dello spettroscopio dell'Osservatorio astronomico di Monte Wilson è possibile ottenere spettri lunghi 20 m, con più di 20000 righe.

116. **Raggi luminosi, calorifici, chimici.** — I raggi luminosi nello spettro solare si estendono, come si è detto, dal rosso al violetto, con un massimo d'intensità nel giallo, che è la parte più luminosa dello spettro.

Ma non sono quelle soltanto le radiazioni che ci pervengono dal Sole. Se si fa scorrere sullo spettro solare un termometro sensibilissimo, ad es., una *pila termoelettrica* (§ 291), o un *bolometro* (§ 270), esso ci accusa un effetto calorifico presso a poco insensibile nel violetto; la temperatura aumenta man mano che si procede verso il rosso; *ma la temperatura cresce ancora nello spazio oscuro oltre il rosso*, dove l'occhio non vede più nulla: indi, dopo aver raggiunto un massimo torna a diminuire, finchè non si ha più indizio di calore ad una certa distanza dal rosso.

Esistono dunque dei **raggi calorifici oscuri**, che si chiamano anche **infrarossi**; se tali radiazioni sono avanti il rosso, vuol dire che sono le meno deviate dal prisma, cioè di una lunghezza d'onda maggiore di 0,76 μ (§ 94) e di un numero di vibrazioni minore di 400 trilioni al minuto secondo.

Su una retta orizzontale XP (Fig. 207), di cui AP rappresenta lo spettro luminoso (in A il rosso e in P l'azzurro) eleviamo nei varî punti dei segmenti ad essa perpendicolari, di lunghezza proporzionale alla temperatura in quel punto constatata; otterremo la curva ivi rappresentata, che mostra la distribuzione del calore nello spettro. Cominciando dall'azzurro la curva si eleva da principio lentamente; vicino al rosso sale più veloce, e s'innalza ancora oltre il rosso A, fino a raggiungere un massimo in M; indi scende prima rapidamente, poi lentamente, fino ad X ove non c'è più calore. L'energia calorifica totale oltre il rosso, rappresentata dalla parte tratteggiata in bianco, è quasi 8 volte quella della parte luminosa, a destra di A. Il calore che ci viene dal Sole è pertanto in massima parte oscuro.

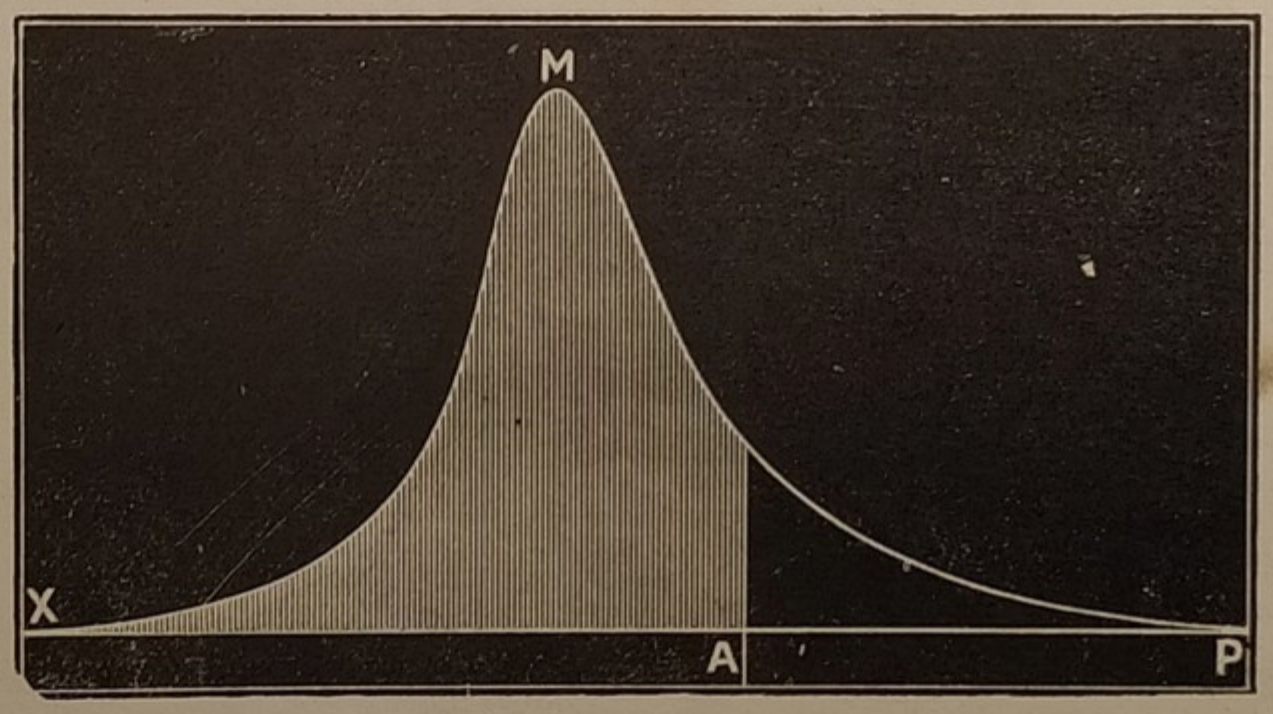


Fig. 207.

Si riscontra infine anche nello spettro dell'infrarosso l'esistenza di righe di assorbimento, prive di calore, analoghe alle righe di Fraunhofer. Sebbene invisibili, questi raggi calorifici oscuri seguono pertanto tutte le leggi e tutti i fenomeni riscontrati per quelli luminosi, compresi quelli d'interferenza e di polarizzazione.

Se raccogliamo lo spettro solare su una lastra fotografica, difesa da ogni altra luce, essa non rimane annerita in corrispondenza del rosso; comincia ad impressionarsi sul giallo, e l'annerimento si accentua sempre più fino al violetto; ma prosegue oltre a questo colore, là dove l'occhio non vede più nulla; dopo aver raggiunto un massimo, si affievolisce fino a un certo punto in cui la lastra non è più impressionata.

Poichè l'annerimento della lastra fotografica è un fenomeno chimico, deduciamo che esistono dei **raggi chimici** o **attinici**, dei quali quelli oltre il violetto non sono visibili, e sono detti **ultravioletti.** Tali raggi sono i più deviati dal prisma, cioè di una lunghezza d'onda minore di 0,39 μ e di un numero di vibrazioni maggiore di 800 trilioni al minuto secondo. Anche in questo spettro chimico si ritrovano delle righe di assorbimento analoghe alle righe di Fraunhofer.

I raggi ultravioletti hanno avuto oggi molte applicazioni industriali e terapeutiche. Essi esercitano una forte azione antibacterica, e si adoperano perciò per la sterilizzazione delle acque. Hanno azione vivificante sul nostro organismo, come mostra l'abbronzamento della pelle sotto i raggi del Sole, e l'arrossamento degli occhi in alta montagna. Su tale azione si basa l'**elioterapia.** Oltre che dal Sole, i raggi ultravioletti possono generarsi artificialmente con opportune *lampade a vapori di mercurio*, (§ 286).

L'insieme di tali tre specie di radiazioni (*calorifiche*, *luminose*, *chimiche*) costituisce l'**energia raggiante del Sole.**

Esistono altre specie di radiazioni? Vedremo in seguito (§ 356), che l'elettricità si può propagare per onde eteree come quelle della luce; oggi si è riusciti a produrre onde elettriche di lunghezza compresa fra qualche chilometro e qualche millimetro; cioè corrispondenti a un numero di vibrazioni compreso fra un centinaio di migliaia e un centinaio di bilioni al minuto secondo. Fra questo ultimo numero, e quello di qualche trilione spettante ai primi raggi infrarossi, che radiazioni vi saranno? Probabilmente si passerà con continuità dai raggi elettrici a quelli calorifici, e la lacuna apparirebbe colmata dagli studi di Arcadiewa (1925); ma potrebbero esservi altre radiazioni ora non note.

Come vi sono altre radiazioni, alcune note altre ancora ignote, dopo quelle dell'ultravioletto; (ad es. i raggi X, § 208; i raggi γ, § 215; i raggi Millikan, § 232). Onde, non tutte le energie dell'Universo sono ora conosciute; e la Scienza probabilmente scoprirà altre energie, di cui ora qualcuna si intravede, e che saprà un giorno sfruttare per il benessere della umanità.

117. **Colore dei corpi.** — Un corpo trasparente, che si lasci attraversare da tutte le radiazioni, è *incolore*; se ne assorbe alcune, appare colorato della luce risultante dall'insieme dei colori che lo attraversano. Così un vetro rosso ci appare tale, perchè assorbe tutti i raggi che riceve tranne i rossi, che lo attraversano ed arrivano al nostro occhio. Onde se sovrapponiamo due vetri, uno rosso e l'altro verde, formano insieme un corpo opaco; infatti il primo vetro lascia passare solo il rosso che non può attraversare il vetro verde, opaco per tale colore.

Analogamente avviene per la diffusione della luce; un pezzo di carta rossa ci appare tale, perchè dei raggi che riceve rimanda al nostro occhio solo i rossi, ed assorbe tutti gli altri. Naturalmente i colori percepiti sono quasi sempre colori composti per somma di più altri; così se vediamo un corpo verde può significare tanto che rimandi al nostro occhio i raggi verdi, quanto che rifletta i raggi gialli e azzurri, che insieme dànno la sensazione del verde. Il nero non è un colore; esso è l'oscurità, è la mancanza di ogni colore. Un corpo si vede nero, allorchè non rimanda nulla della luce che riceve (§ 11).

La *colorazione azzurra del cielo* è dovuta in parte ad assorbimento ed in parte a diffusione della luce. Se l'aria fosse perfettamente trasparente e priva di pulviscolo, il cielo apparirebbe nero; ed è infatti di un azzurro tanto più cupo, tendente al nero, quanto più si sale in alta montagna. La colorazione azzurra dipende in parte dall'assorbimento dei raggi meno rifrangibili, dovuto specialmente all'ossigeno dell'atmosfera; si ricordi (Vol. 1° - § 305) il colore azzurro dell'aria liquida. Ma interviene con l'assorbimento, la diffusione della luce per causa delle particelle di pulviscolo e di minutissime goccioline di umidità, sospese nell'aria. Per la piccolezza di tali particelle, i raggi di maggiore lunghezza d'onda (verso il rosso) provenienti dalla terra illuminata dal sole, contornano queste particelle e proseguono oltre verso l'alto; mentre i raggi di minore lunghezza d'onda (verso l'azzurro) sono riflessi dalle particelle verso il basso (vedasi l'analogia riportata al § 98), e producono la colorazione azzurra. Per la stessa ragione, il cielo all'orizzonte al tramonto o all'aurora, dalla parte del Sole, appare aranciato; perchè allora arrivano all'occhio i raggi del Sole trasmessi e non riflessi, cioè prevalentemente quelli verso il rosso.

118. **Colori complementari.** — La luce bianca, oltre che con la riunione di tutti i colori dello spettro solare, può ottenersi con l'unione di due soli colori; ad es. il *rosso* ed il *verde*. Due colori la cui somma sia la luce bianca, si chiamano **colori complementari.**

Per sommare il rosso ed il verde, non si devono prendere un vetro rosso ed uno verde e sovrapporli; con ciò si ha la differenza e non la somma dei due colori; infatti, come si è detto avanti, in tal modo non passa più luce dai due vetri. Ma si deve, ad es., accendere contemporaneamente in una stanza una lampada circondata da un vetro rosso, ed un'altra circondata da un vetro verde: la stanza sarà illuminata di luce bianca.

Si può ottenere la somma di due colori complementari, per mezzo del disco di Newton, descritto nel § 44. Facendo uso di un disco di cartone dipinto in settori alternativamente rossi e verdi, e facendolo ruotare rapidamente, esso apparirà di colore bianco uniforme.

Altre coppie di colori complementari sono: l'*aranciato* e l'*azzurro*, il *giallo* e l'*indaco*, ecc.

Problemi da risolvere.

1. In uno spettroscopio si ottengono le righe A e H di Fraunhofer alla distanza di mm. 180. Calcolare la posizione delle altre sei righe, (vedi § 115; si supponga la distanza tra due righe proporzionale alla differenza di lunghezza d'onda).

2. Calcolare lo spostamento della riga F a causa del movimento della stella Sirio di cui al § 113, supponendo che nello spettro osservato le righe F e G appaiano distanti mm. 15.

Assorbimento dell'energia raggiante.

119. **Calorescenza.** — In questo Capitolo daremo un breve cenno dei fenomeni dipendenti dall'assorbimento delle varie specie di radiazioni.

Un corpo, assorbendo raggi calorifici oscuri, può riscaldarsi tanto da diventare incandescente, e quindi luminoso. Tale fenomeno si dice **calorescenza**; esso è la trasformazione dei raggi calorifici in luminosi.

120. **Fosforescenza.** — Vi sono corpi che esposti per qualche tempo al sole e poi portati all'oscuro, emettono luce, che può essere di tinta diversa da un corpo all'altro; tale fenomeno si chiama **fosforescenza.** Così, p. es., sono fosforescenti il *solfuro stronzico*, il *cloruro di zinco*, ecc.

Il tempo per cui dura la fosforescenza varia da corpo a corpo e può durare da frazione di secondo a qualche ora. La tinta della luce emessa dipende non solamente dalla qualità della sostanza, ma anche dalla temperatura di essa. Così, per il solfuro stronzico il colore della luce emessa varia dal violetto all'aranciato, passando per tutte le gradazioni intermedie dello spettro, man mano che tale sostanza si riscalda da 20° a 200°.

La fosforescenza è provocata dai raggi chimici, ed è una trasformazione di tali raggi in luminosi. Infatti, le sorgenti luminose povere di raggi violetti come le fiamme, agiscono debolmente; invece la luce dell'arco voltaico, e quella del magnesio, molto ricche di raggi ultravioletti, sono molto atte a destare fosforescenza viva e durevole. Ma una prova più diretta si ha facendo cadere lo spettro del Sole su un cartone spalmato di una sostanza fosforescente; si vedrà questa illuminarsi specialmene nella regione del violetto, *ed anche al di là del violetto.*

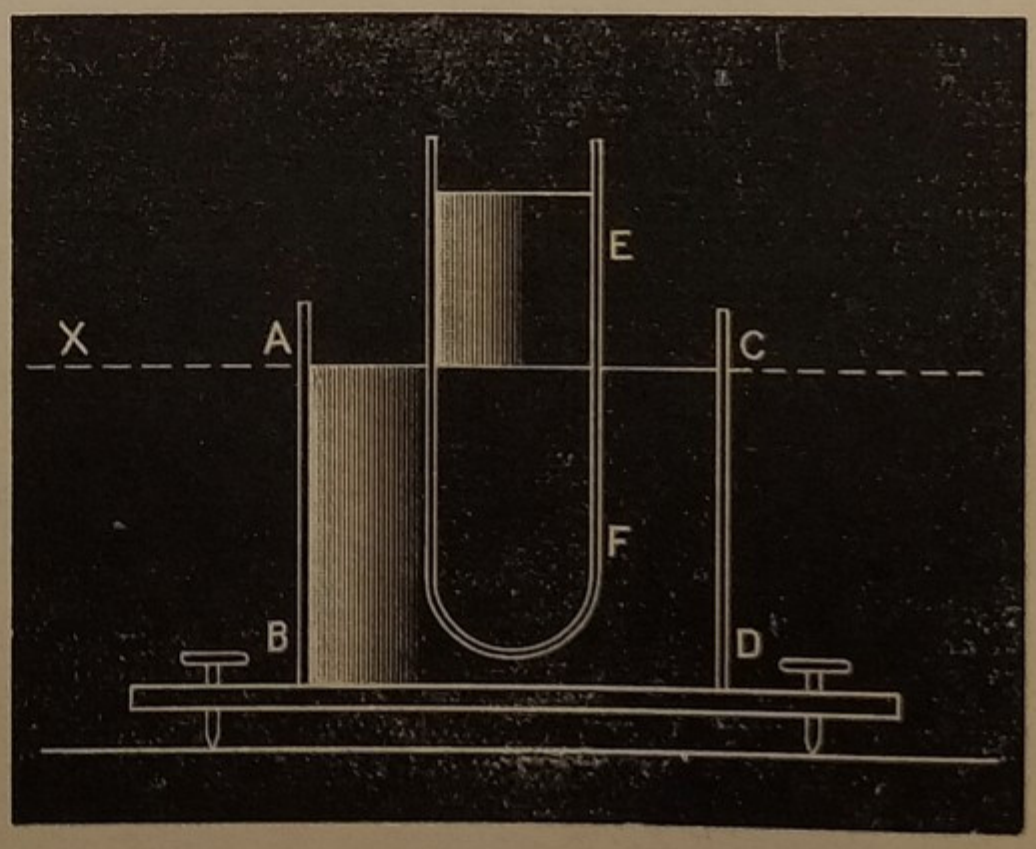


Fig. 208.

Il calore non provoca la fosforescenza, ma la intensifica ed accelera; cioè un corpo fosforescente riscaldato emana luce più viva, ma per minor tempo.

121. **Fluorescenza.** — Alcuni corpi sono fosforescenti solo durante il tempo in cui sono esposti alla luce; essendo la luce emessa diversa da quella che ricevono, ne deriva un cambiamento di tinta specialmente alla superficie; onde queste sostanze sembrano per diffusione, di colore diverso che viste per trasparenza. Così si comportano, ad es., soluzioni di *fluorescina*, di *solfato di chinino*, di *clorofilla*, ecc.; e un po' anche il *petrolio*.

Questo fenomeno si chiama **fluorescenza.** Anch'esso è dovuto all'assorbimento dei raggi più rifrangibili; si osserva solo alla superficie, perchè i

raggi che lo provocano sono assorbiti dal primo strato di sostanza che attraversano; i raggi che penetrano oltre nella sostanza, non sono quindi più capaci di provocare la fluorescenza. Così, se si pongono uno dentro l'altro due recipienti di vetro AB ed EF contenenti un liquido fluorescente (Fig. 208), questo presenta la fluorescenza alla superficie AB e nella parte di EF che è fuori di AB; ma non vi è fluorescenza nella parte immersa di EF. Per questo la fluorescenza va anche sotto il nome di **diffusione superficiale.**

I fenomeni di fosforescenza e di fluorescenza vanno anche sotto il nome di **luminescenza.**

122. **La fotografia.** — Con la **fotografia** si riproducono e si fissano automaticamente le immagini degli oggetti. L'inventore della fotografia è il francese Daguerre (1830); ma il procedimento odierno è molto cambiato da allora.

Per ottenere le immagini da riprodurre occorre la **macchina fotografica,** che abbiamo già descritta nel § 68. Allorchè si è messa l'immagine *a fuoco* si chiude l'otturatore, si toglie il telaio con il vetro smerigliato, ed al suo posto si mette un astuccio ben chiuso, detto **châssis,** contenente la **lastra sensibile,** la quale deve occupare esattamente il posto in cui era dapprima il vetro smerigliato. Si scopre allora nell'interno della macchina la lastra sensibile, e si apre l'otturatore per breve tempo (frazione di secondo); in modo che l'immagine si formi sulla lastra sensibile, che rimane impressionata.

La lastra sensibile è una lastra di vetro (o di celluloide, e allora si chiama **la pellicola**), ricoperta su una faccia da uno strato di gelatina contenente del bromuro di argento. Questa sostanza ha la proprietà di annerire sotto l'azione della luce; ma l'annerimento è indiretto, cioè si rende manifesto solo se dopo l'azione della luce, agisce un'opportuna sostanza chimica, (**bagno di sviluppo**).

Difatti, portata la lastra impressionata in un **gabinetto oscuro,** illuminato da luce rossa che non impressiona la lastra (§ 116), non si scorge niente sulla sua superficie. Ma messa nel bagno di sviluppo, che è una soluzione di sostanze riduttrici (*metolo*, *idrochinone*, ecc...) i punti colpiti dalla luce corrispondenti ai punti chiari dell'oggetto, anneriscono; perchè il bromuro d'argento quasi incolore, *è ridotto* in polvere tenuissima di *argento nero*; i punti oscuri dell'immagine restano invece inalterati.

Si ottiene così l'immagine coi chiari e scuri invertiti rispetto all'oggetto; e che perciò si chiama **la negativa,** (Fig. 209).

Dopo il bagno di sviluppo occorre quello **di fissaggio,** formato di una soluzione di iposolfito di soda, che ha la proprietà di sciogliere e quindi portar via dalla lastra il bromuro d'argento non ancora impressionato; indi la negativa si lava abbondantemente, si lascia asciugare, e *si ritocca* per correggere i difetti della figura; così è pronta per **la stampa.**

Questa si fa ponendo la negativa in apposito telaio, e contro di essa un foglio di **carta sensibile**; cioè carta avente su una faccia uno strato di gelatina contenente citrato d'argento, che è un sale che si annerisce direttamente alla luce. Si espone il tutto al sole, in modo che la luce attraversi la negativa e poi batta sulla carta sensibile. Nei punti scuri della negativa

la carta non s'impressiona e rimane bianca; nei punti chiari invece annerisce. Si forma così un'immagine con le tonalità eguali all'oggetto, ma in

Fig. 209.

Fig. 210.

una tinta sola, *senza colori*; essa si chiama **la positiva** e se ne possono stampare quante copie si vuole, senza che la negativa si alteri o si consumi (Fig. 210). Tali positive si immergono in un bagno contenente una sostanza, che dà all'immagine una tinta più gradevole (**bagno di viraggio**), e poi in un bagno di fissaggio, come per le negative. Spesso i due bagni sono mescolati, e formano un **bagno unico di viraggio e fissaggio.**

Vi sono delle carte spalmate di gelatina con bromuro di argento, che si impressionano con la luce artificiale, e si sviluppano e fissano come le negative. Esse dànno immagini di un bel nero, e sono ora molto adoperate. Essendo più rapide permettono **gli ingrandimenti,** mettendo la negativa in un apparecchio di proiezione (§ 69) e proiettando l'immagine ingrandita su un foglio di tale carta al bromuro.

123. **La fotografia ultrarapida.** — Sono inestimabili i servigi che rende la fotografia in ogni campo della vita, della Scienza e dell'industria. La fotografia e la cinematografia hanno assunto un'importanza fondamentale non solo nelle ricerche scientifiche, ma anche in molte applicazioni di controllo industriale. La possibilità di impressionare la lastra fotografica con pose di $^1/_{2000}$ di secondo, ha permesso di ottenere le fotografie di oggetti in rapido movimento, come animali in piena corsa, automobili lanciate alla velocità di oltre 200 km. all'ora, ecc. Illuminando con una scintilla elettrica un oggetto in rapidissimo moto, se ne è ottenuta l'immagine durante il tempo di meno di un milionesimo di secondo; si sono prese in tal modo le fotografie del volano di un motore di automobile che compie 50 giri al secondo, dell'elica di un aeroplano che fa oltre 2400 giri al minuto, e perfino

di un proiettile da fucile che si muove con velocità maggiore di 700 m. al s.! Tali fotografie riproducono gli oggetti nettissimi, come se fossero fermi.

La macchina fotografica applicata al microscopio, ci svela i misteri della vita dei microrganismi; annessa al telescopio, ci riproduce le mosse dei mondi lontani migliaia di anni di luce. Si sono costruite macchine fotografiche così piccole, da nascondersi nel pomo di un bastone o nel nodo di una cravatta; la Fig. 211

Fig. 211.

mostra come si può fotografare l'interno dello stomaco, introducendovi dalla bocca una minuscola macchina fotografica, corredata di una piccola lampadina elettrica.

La cinematografia infine, ci ha permesso di riprodurre tutte le fasi di qualsiasi movimento, per quanto rapido: il pulsare del cuore, il cammino del cibo negli intestini durante la digestione, la deformazione degli organi di una macchina in moto, il volo di una libellula (Fig. 212), ecc. I giapponesi Sahura, Kato e Kamei a Tokio, sono riusciti ad ottenere su una pellicola sino a 100 000 fotografie al minuto! Proiettando queste pellicole con un apparecchio cinematografico comune, cioè con la velocità di 18 immagini al secondo, si riproduce il movimento con una lentezza tale, da renderne facile l'osservazione delle singole fasi parziali, ed assistere allo svolgimento di molti fra i più delicati, i più rapidi ed evanescenti fenomeni. Così si può

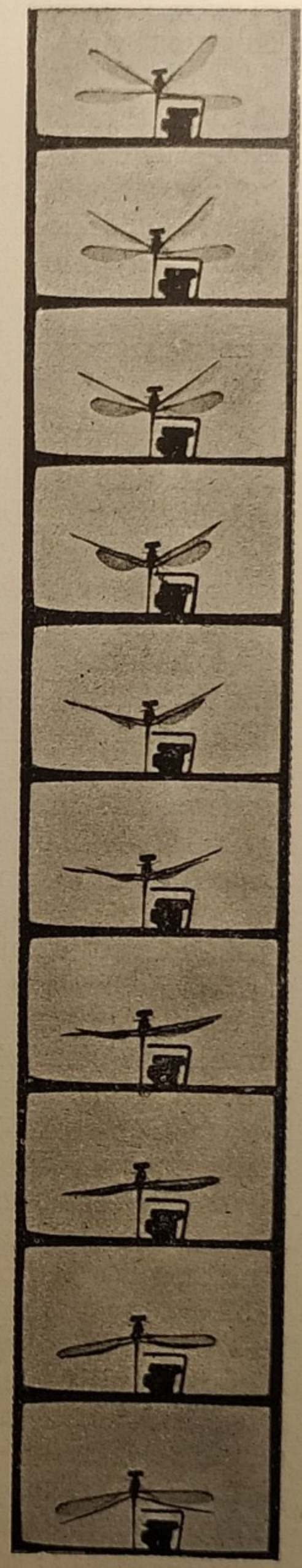


Fig. 212.

osservare il movimento di un proiettile che si vede passare sullo schermo con piccola velocità, tale da assistere all'urto di esso contro un ostacolo, alla progressiva penetrazione in questo, all'uscita dall'altra parte...

124. **La fotografia a colori.** — Le ordinarie fotografie riproducono le immagini, come s'è detto, in un tono solo, ordinariamente in nero. Si è da tempo cercata la soluzione della **fotografia a colori,** riproducente le immagini coi loro colori naturali. Il problema non è ancora completamente risolto; ma si ottengono già risultati assai soddisfacenti col *processo Lumière.*

Questo metodo è basato sul fatto che la luce bianca può essere ottenuta con la fusione in proporzioni opportune, di tre soli colori, che si chiamano i **colori fondamentali**: *il rosso*, *il giallo* e *l'azzurro*. Anche gli altri colori possono ottenersi con la combinazione di due o tutti e tre questi; così il verde si può ottenere con la combinazione del giallo con l'azzurro, il violetto con l'azzurro più il rosso, ecc. La fusione dei colori può ottenersi non solo mescolando sostanze colorate diversamente, o con la sovrapposizione di luci diversamente colorate; ma può anche avvenire per la proprietà dell'occhio di percepire un colore unico composto, se riceve luce da varî punti diversamente colorati, distinti; ma così vicini che non si possono scorgere separati, e la loro immagine si confonda in una sensazione sola. È ciò che avviene nella pittura eseguita col *metodo divisionista.*

Ciò posto, vi sono in commercio delle **lastre autocrome,** formate di una lastra di vetro, su cui è steso uno strato di una miscela di granuli trasparenti, piccolissimi, di amido (del diametro di circa 0,01 mm.) colorati separatamente nei tre colori fondamentali; lo spessore dello strato non deve sorpassare il diametro dei granuli; gli interstizi fra granello e granello sono otturati con finissima polvere nera di grafite. La finezza della granitura è tale, che ogni mm^2 contiene da 6 a 7 mila granelli; la proporzione dei varî granelli colorati è tale da dare all'occhio la sensazione del bianco.

Sopra a questo strato è distesa una vernice di protezione, e su questa l'emulsione sensibile al bromuro d'argento, contenente sostanze che la rendono atta ad impressionarsi anche alla luce rossa (**lastre ortocromatiche**). Si fa la fotografia di un oggetto colorato, al solito modo; però con una posa più lunga, ponendo avanti all'obiettivo un vetro giallo speciale, e rivolgendo verso di questo non la superficie sensibile della lastra, ma la parte del vetro; in modo che la luce debba prima attraversare lo strato dei granuli colorati e poi arrivare allo strato sensibile.

Allora avverrà questo che: nelle parti ove l'immagine è ad es. rossa, la luce rossa attraverserà solo i granuli d'amido rossi, e non gli altri che per il rosso sono opachi (§ 117), e la lastra rimarrà impressionata, cioè annerita, sotto tali granuli; mentre sotto gli altri granuli di colore diverso, non rimane impressionata. Analogamente avverrà per i raggi di luce degli altri colori. Sviluppando la lastra con un **primo sviluppo,** e poi guardandola contro luce, per questo annerimento non potremo vedere i granuli rossi dove è caduta la luce rossa, nè i granuli verdi dove è caduta la luce verde, ecc.; cosicchè la lastra apparirà come *negativa*, mostrando nei varî punti il colore complementare (§ 118) di quello dell'oggetto riprodotto.

Dopo una lavatura, la lastra s'immerge nel **bagno d'inversione,** che è una sostanza ossidante (permanganato di potassio ed acido solforico), la

quale scioglie l'argento metallico ridotto, cioè annerito, nel primo sviluppo; e non altera il bromuro non impressionato. In tal modo dove prima era un punto nero della gelatina, ora si forma un punto trasparente. Portando la lastra alla luce, e sottoponendola ad un **secondo sviluppo,** essa annerisce nei punti in cui era rimasta bianca nel primo sviluppo; e viceversa rimane trasparente dove era annerita dapprima. Cioè si ottiene la positiva; guardando la lastra contro luce, si vedrà ora i granuli rossi di amido nei punti ov'era caduta la luce rossa, e così per gli altri colori. Si vedrà cioè l'immagine coi suoi colori naturali.

Questo procedimento permette di ottenere *una sola copia*; quella sulla lastra esposta direttamente nella macchina. Ma si spera che i continui perfezionamenti gli torranno quei difetti che ancora esso presenta.

Produzione artificiale della luce.

125. **Produzione della luce per combustione.** — Il primo modo con cui l'uomo pensò di rischiarare la notte, fu la fiamma ottenuta dalle sostanze combustibili; ricorrendo all'accensione di rami di piante, o arbusti, o foglie, ecc. Poi pensò di impregnare opportuni corpi con sostanze resinose, e costruì *le torce*, che potevano così trasportarsi. Più tardi furono perfezionati tali mezzi di illuminazione, con *le candele* ancora oggi persistenti nell'uso domestico, formate da un conveniente stoppino circondato da una sostanza combustibile solida, che fondendosi a poco a poco sotto l'azione della fiammella dello stoppino, imbeve questo e ne alimenta la combustione. Quale sostanza combustibile si adoperarono i grassi animali (sego, spermaceti, ecc.) e vegetali (cera, ecc.); solo dal secolo scorso si impiegano la *paraffina* e la *stearina*; quest'ultima oramai più adoperata nella fabbricazione delle candele.

La luce delle candele non è certamente l'ideale per intensità e costanza; nelle condizioni più favorevoli si tratta di sorgente luminosa di appena qualche candela internazionale di luce, la cui intensità può variare anche del 50%, a secondo lo stato dello stoppino. Persiste tuttavia l'uso della candela per la facilità di trasporto di essa e l'indipendenza da una distribuzione centrale del mezzo illuminante.

Maggiore importanza ebbero le **lampade** in cui la luce è ottenuta con la combustione di una sostanza liquida o gassosa.

126. **Lampade a combustibile liquido.** — Più usati sono i combustibili liquidi; si chiamano *lampade* apparecchi costituiti da un recipiente contenente il combustibile, in cui s'immerge uno stoppino di forma opportuna che s'imbeve del liquido, trasportato così per capillarità nel punto di ignizione. Quale combustibile, fino al principio dell'800 si adoperarono esclusivamente gli olii vegetali, tra cui più comunemente l'olio di *colza*. Un grande perfezionamento si ottenne, circa un secolo fa, con la scoperta del *petrolio*, tutt'ora largamente adoperato. Il petrolio, o olio minerale, è ricavato per distillazione della *nafta* naturale (Vol. 1° - § 238); è limpido, leggero, scor-

revole, e perciò lo stoppino s'imbeve facilmente e porta il liquido rapidamente all'estremità, anche se il serbatoio è parecchi centimetri al di sotto di tale estremo.

Ma la fiamma diretta del petrolio è fuligginosa, perciò inadatta all'illuminazione. Si eliminò questo inconveniente con l'invenzione del **becco Argand** (Fig. 213), nel quale lo stoppino è cilindrico, vuoto in mezzo, e comunicante questo vuoto con l'aria esterna; la fiamma avviene dentro un tubo di vetro, di diametro maggiore in basso attorno alla fiamma, minore nella parte restante più lunga; tra le due parti vi è una strozzatura. Il tubo fa da camino e produce un forte tiraggio; l'aria esterna, richiamata dal basso per tale tiraggio lambisce la fiamma internamente ed esternamente, ed assicura la completa combustione dei vapori di petrolio.

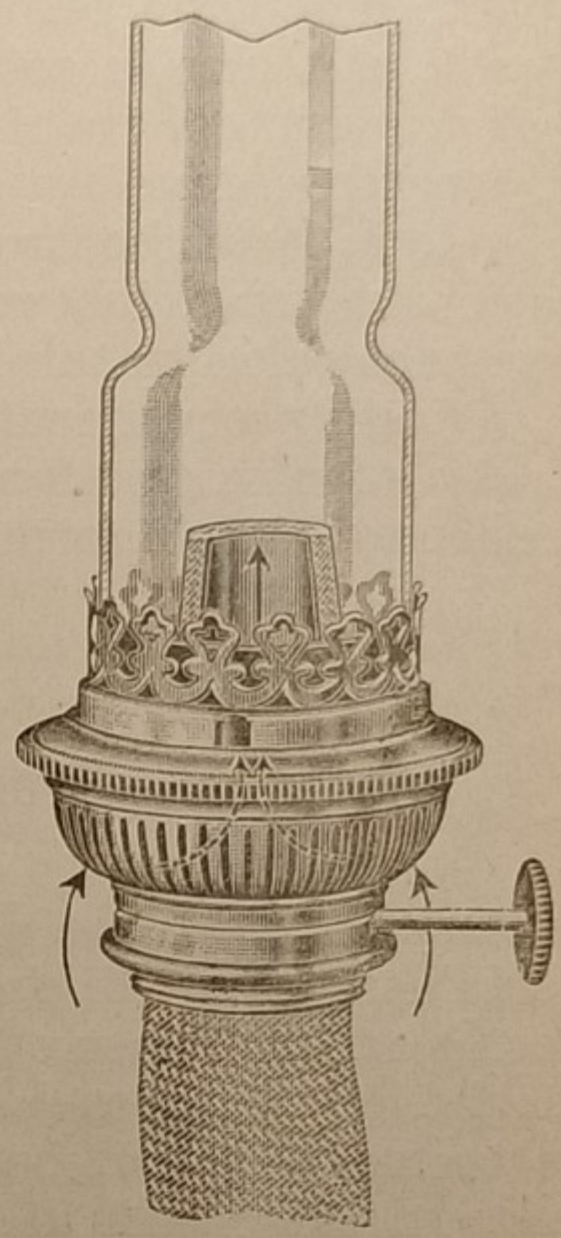


Fig. 213.

Una comune lampada a petrolio produce da 8 a 12 cand. di luce; ma se ne costruiscono di più intense, anche sino a 50 cand.

127. **Lampade a combustibile gassoso.** — La produzione del *gas illuminante* dalla distillazione dei litantraci (Vol. 1° - § 239) ha permesso da circa un secolo la diffusione di tale gas per illuminazione pubblica e privata nelle grandi città, in cui era conveniente affrontare le forti spese d'impianto per la canalizzazione occorrente per la distribuzione di esso. Il gas illuminante forniva luce più intensa e più economica e più comodamente che non il petrolio; la sua comparsa nell'illuminazione segnò a suo tempo un grande progresso e fu salutata come una delle migliori realizzazioni della scienza. L'impiego del gas per illuminazione si faceva per mezzo di **becchi a farfalla** (Fig. 26 - § 17); cioè il gas usciva da una sottile fenditura fatta in un beccuccio di sostanza refrattaria (*steatite*) ed ardeva direttamente nell'aria, senza bisogno di tubi di tiraggio. Questi becchi fornivano luce più viva e più economica del petrolio, e non richiedevano pulizia frequente come le lampade a petrolio e il rifornimento del combustibile. L'intensità luminosa di ciascun becco era attorno alle 16 cand.

Tale sistema di illuminazione si estese sino ad una cinquantina d'anni fa. Ma verso il 1885 sorsero i primi impianti di illuminazione elettrica, ed il nuovo mezzo acquistava presto il favore del pubblico per l'eleganza, l'igiene, e la comodità, pur essendo il costo della luce ottenuta non inferiore a quello del gas. Si studiò pertanto di utilizzare meglio la combustione del gas, e vi si riuscì a pieno per mezzo del **becco Auer** inventato attorno al 1892 e presto diffusosi ovunque.

Nel becco Auer (Fig. 214) il gas non viene utilizzato per la luce diretta che esso fornisce; ma viene bruciato in un becco Bunsen, che fornisce una fiamma assai calda, sebbene senza luce. Tale fiamma penetra nell'interno di una sottile *reticella* a forma di cappuccio, di sostanze incombustibili, dotate di alto potere emissivo (ossidi di metalli alcalino-terrosi: torio con

piccola percentuale di cerio, ecc.). La reticella, col calore della fiamma diviene incandescente ed emana luce vivissima e bianca (con toni alquanto verdastri). Una reticella normale fornisce inizialmente circa 60 cand. di luce; ma l'intensità si abbassa rapidamente specialmente per piccole lacerazioni che si producono spontaneamente nelle maglie della reticella, fragilissima. Uno di questi becchi consuma circa 100 litri di gas ogni ora, e il costo unitario della luce è così di circa L. 0,15 per 100 cand. orarie.

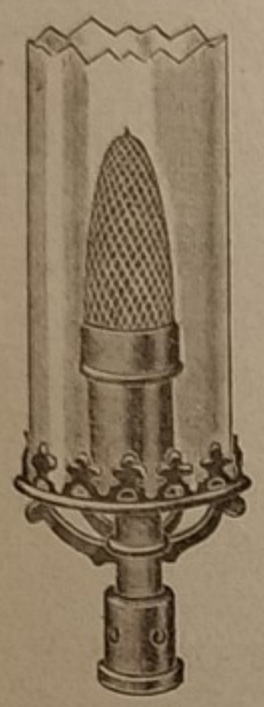


Fig. 214.

La comparsa della reticella Auer dette il tracollo all'illuminazione elettrica, allora agli inizi della sua applicazione; il costo unitario della luce con le lampade elettriche a filamento di carbone di allora, era una volta e mezzo quello della reticella, sicchè non bastava la maggiore comodità ecc. a consigliarne l'adozione.

La reticella Auer tenne il primato nell'illuminazione per una quindicina d'anni, finchè non si trovarono le nuove lampade elettriche a filamento metallico, di cui parleremo in seguito, il cui consumo è meno di ⅓ di quelle a filamento di carbone (a pari luce). Oggi l'illuminazione a gas è solo adoperata nei paesi in cui abbonda il carbon fossile (Inghilterra, ecc.) ove il gas si produce quasi gratuitamente, mentre sono scarse le forze idrauliche da cui si ricava l'energia elettrica a buon mercato.

Contemporanea alla reticella Auer è la scoperta dell'**acetilene**, altro combustibile gassoso, che si ricava per scomposizione del *carburo di calcio* con l'*acqua*. L'acetilene arde in becchi a farfalla, simili a quelli primitivi del gas illuminante; la sua luce è viva, bianca, costante; quindi incontrò presto il favore del pubblico, specialmente quando non si poteva usufruire nè del gas nè della luce elettrica. Si sono costruiti piccoli gasogeni per la produzione dell'acetilene, facilmente trasportabili; ed è appunto con lampade trasportabili che ha la maggiore applicazione questo nuovo gas.

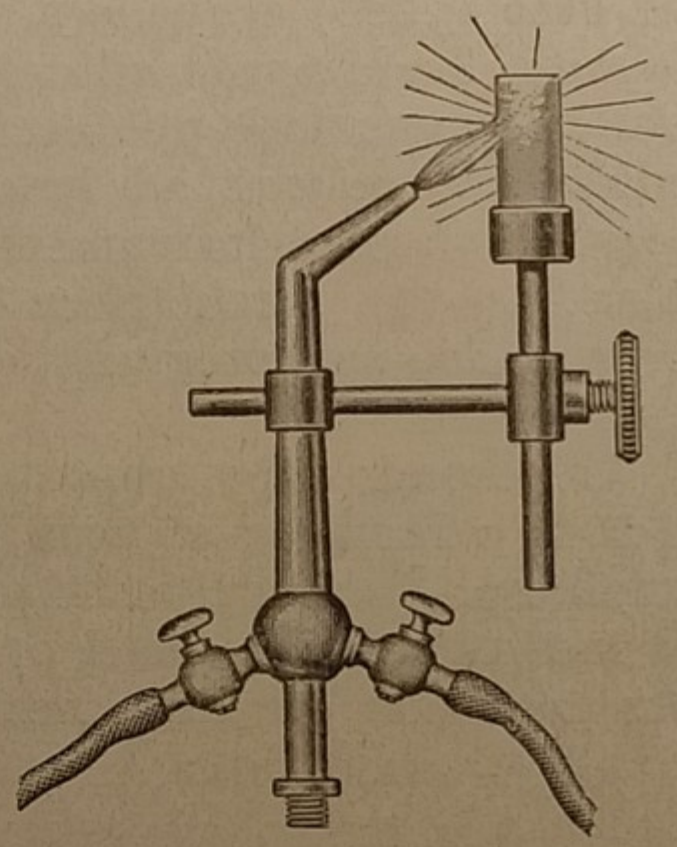


Fig. 215.

128. **Lampade ad incandescenza.** — Un'altra maniera di generare la luce, è quella di portare all'incandescenza, per riscaldamento, sostanze opportune; che in tal modo emettono luce senza bruciare e quindi senza consumarsi. Questo è il modo più recente e più conveniente della produzione della luce.

Il becco Auer, descritto nel paragrafo precedente, appartiene a questo tipo di lampade. Non è solamente il gas che si utilizza per rendere la reticella incandescente; ma si adoperano anche combustibili liquidi (petrolio, benzina, alcool, ecc.) vaporizzati in speciali becchi, in modo da ottenere una fiamma calda, assimilabile a quella del becco Bunsen.

Accenniamo brevemente alla **luce Drummond** (Fig. 215), ottenuta portando all'incandescenza un *bastoncino di calce*, o un dischetto di *ossido di*

zirconio, per mezzo della fiamma ossidrica (idrogeno + ossigeno) la cui temperatura supera i 1800°. Questa illuminazione però oramai non è quasi più adoperata; nè del resto ha mai avuto grande diffusione neanche nel passato.

Ma il modo migliore di portare all'incandescenza un solido, è quello di arroventarlo con la corrente elettrica; il solido assume la forma di sottile filamento, e si ha così la notissima **lampada elettrica ad incandescenza,** di cui parleremo più diffusamente in *Elettricità* (§ 285). Vi sono oggi in uso due tipi di *lampadine a filo metallico*: la *lampadina normale*, il cui consumo unitario è di circa L. 0,18 per le 100 cand. orarie, e la *lampadina mezzo-watt*, il cui consumo unitario è circa la metà della precedente. Le prime si adoperano per le intensità luminose più basse (da 5 a 32 cand.); le altre per le lampade più potenti (da 50 cand. in su).

Potendosi adoperare filamenti il cui punto di fusione è altissimo (oltre i 3000°), la luce ottenuta con queste lampade è assai viva, e si avvicina più che con le altre alla luce bianca solare. Per questo l'illuminazione elettrica è oggi la più conveniente sotto tutti i riguardi, e perciò la più diffusa.

129. **Lampade a gas luminescente.** — La luce emanata da un gas può ottenersi non per combustione, ma portando il gas ad alta temperatura con corrente o scarica elettrica. Al primo tipo appartengono le **lampade ad arco** (§ 286) e quelle **a vapore di mercurio** (§ 286), di cui parleremo in seguito. Le *lampade ad arco*, di fortissima intensità, sono state adoperate per l'illuminazione pubblica sino al 1915 circa; poi furono sostituite con le odierne *mezzo-watt* ad incandescenza. Le *lampade a vapori di mercurio*, servono quasi esclusivamente per la produzione di luce di piccola lunghezza d'onda (§ 94), perchè ricca di raggi violetti ed ultravioletti (§ 116); si adoperano cioè per fotografia, e per cure mediche speciali, in sostituzione della luce solare.

Al secondo tipo appartengono le **lampade a scarica nei gas rarefatti** (§ 204) o **lampade al neon,** adoperate oggi esclusivamente per pubblicità luminosa; ma di cui se ne preconizza l'uso in un prossimo avvenire, perchè la luce ottenuta è quasi priva di calore e quindi più economica di quella ottenuta con gli altri mezzi.

Tecnica dell'illuminazione (1).

130. **Condizioni per la visione normale.** — La Tecnica dell'illuminazione concerne tutto quanto riguarda l'impiego delle sorgenti luminose naturali ed artificiali, a secondo degli scopi da raggiungere. Ora, lo scopo principale da ottenere, è che l'illuminazione degli oggetti sia tale che l'occhio non si affatichi per vederli, e che li scorga nelle condizioni migliori per la visione chiara e distinta.

---

(1) Quasi tutti i *clichés* e molti dati tecnici di questo capitolo, sono stati tolti dal bellissimo manuale: Ing. Guido Peri, *La illuminazione elettrica moderna*, Editori S. Lattes e C., Torino; ove l'argomento è trattato magistralmente e con molta maggiore ampiezza che nei cenni qui riportati non era consentita.

L'occhio si affatica sia quando l'illuminazione è scarsa, sia quando è troppo viva; meglio, l'occhio si affatica tanto più, quanto più forti sono i contrasti tra le parti chiare e quelle oscure dell'oggetto illuminato. La visione comoda pertanto dipende dalla forma e posizione delle sorgenti luminose e specialmente da una razionale ripartizione delle ombre da esse prodotte. Si attenuano tanto più i contrasti delle ombre, quanto più estesa è la sorgente luminosa; quindi la sorgente luminosa più vantaggiosa è quella di grande superficie e di minimo splendore. Perciò il mezzo migliore di illuminazione è quello naturale della luce diffusa (e non diretta) del Sole; cioè la luce proveniente dalla diffusione dei muri o altri corpi illuminati dal Sole, e dal cielo. La tecnica insegna ad avvicinarci più che si può a tale condizione, con l'uso di sorgenti luminose, specialmente artificiali.

Abbiamo detto che occorre che l'illuminazione non sia nè scarsa nè forte; un'illuminazione insufficiente stanca l'occhio per lo sforzo che deve fare per scernere i dettagli dell'oggetto poco illuminato; un'illuminazione intensa stanca l'occhio egualmente e genera l'*abbagliamento* (§ 89). L'osservazione ha portato a fissare i seguenti valori per l'intensità dell'illuminazione più adatta nei casi più comuni:

Ambienti d'abitazione:	ingressi - corridoi	10 - 20 lux
	camere da letto	20 - 50 »
	sala da pranzo - studio. . . .	30 - 60 »
Scuole:	aule da lezione o da conferenze .	40 - 60 »
	aule da disegno o da lettura .	50 - 100 »
Uffici		30 - 50 »
Negozi:	interno	50 - 100 »
	vetrine	100 - 200 »
Teatri, caffè		50 - 100 »
Locali industriali:	illuminazione generale	10 - 20 »
	» individuale . . .	40 - 60 »
Strade - piazze		0,5 - 15 »

131. **Illuminazione diretta - Riflettori.** — Con l'illuminazione diretta, i raggi emanati dalla sorgente luminosa colpiscono direttamente la superficie illuminata. Come abbiamo già accennato, nella illuminazione bisogna evitare le ombre e i contrasti troppo forti; inoltre occorre diminuire lo splendore della sorgente luminosa, per evitare molestia all'occhio e l'abbagliamento. Occorre poi, per l'utilizzazione più economica della luce, evitare che essa si disperda illuminando direzioni in cui l'illuminazione non si richiede; bisogna perciò modificare convenientemente la distribuzione della luce emanata.

I **riflettori** servono a rimandare in una direzione più utile, parte dei raggi luminosi che altrimenti sarebbero perduti. Così, ad es., nell'illuminazione stradale, si rimanda sul suolo il flusso luminoso che andrebbe perduto verso il cielo. Essi sono coni a grande apertura, o calotte, coppe, ecc., di metallo o di vetro, sovrapposti alla lampada; ve ne sono lisci ed ondulati,

opachi o traslucidi, ecc. Quelli lisci possono essere di metallo argentato o cromato o smaltato; o di vetro argentato od opalino. Quelli ondulati possono essere ad onde concentriche, o ad onde radiali, a curvatura diversa (parabolici, ad angolo, cilindrici, ecc.), o di svariatissime altre forme, usate

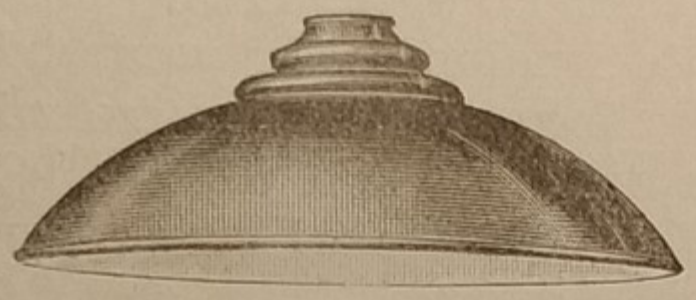


Fig. 216.
Riflettore di ferro smaltato a bacino piatto.

Fig. 217.
Riflettore di ferro smaltato a cono.

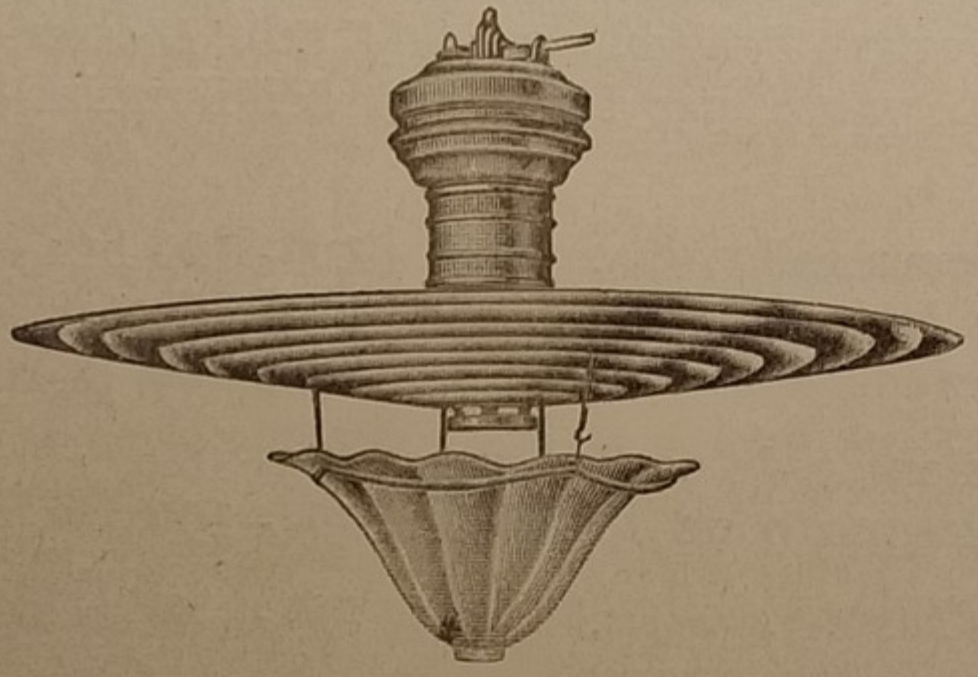


Fig. 218.
Lampada con riflettore ad onde concentriche.

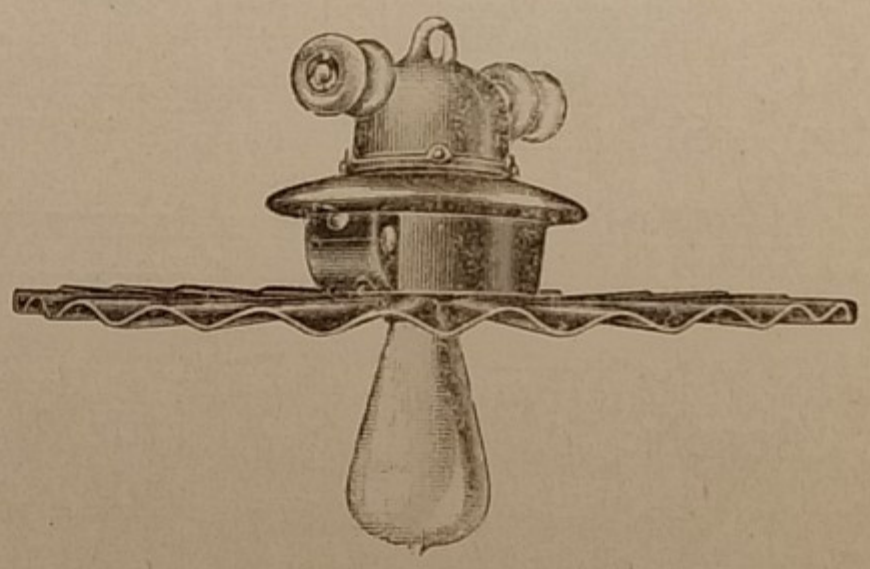


Fig. 219.
Lampada con riflettore ad onde radiali.

Fig. 220.
Lampada con riflettore parabolico uniforme.

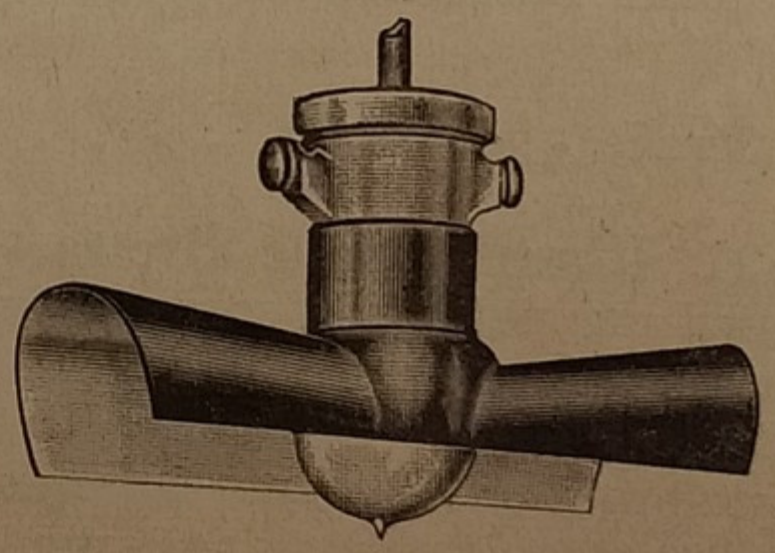


Fig. 221.
Lampada con riflettore parabolico a due direzioni.

più che altro a scopo decorativo, delle quali non si può fare una classificazione razionale.

I *riflettori di metallo* sono specialmente impiegati a scopi industriali, essendo di minor costo e meno fragili degli altri. Le Figg. 216-221 mostrano alcuni dei tipi più comunemente adottati.

I *riflettori in vetro opalino* agiscono per riflessione e per trasparenza, quindi formano una categoria mista di *riflettori-diffusori*; servono per i locali abitati e consentono una maggiore illuminazione sul piano di lavoro e minore verso il soffitto e le pareti; essi sono più decorativi di quelli di metallo. Le Figg. 222-223 mostrano alcuni di questi riflettori.

Fig. 222.
Riflettore opale a coppa.

Fig. 223.
Riflettore opale a bacino.

I *riflettori in vetro prismatico* sono una categoria di *riflettori-rifrattori*; sono di vetro trasparente, con cui si ottiene in alto la diffusione della luce

Fig. 224.
Riflettore di vetro prismatico estensivo.

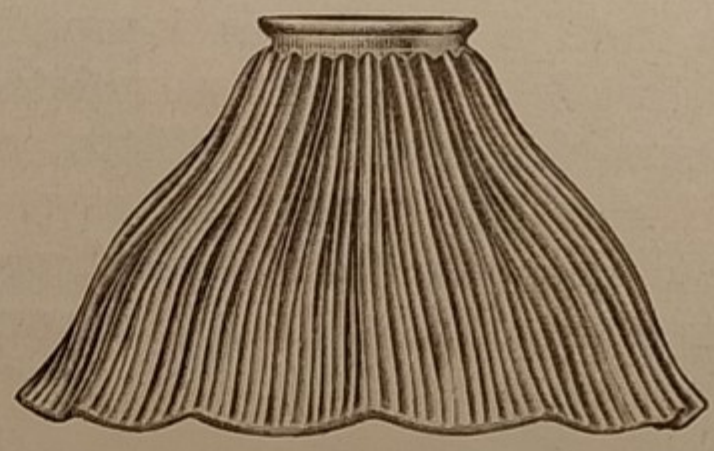


Fig. 225.
Riflettore di vetro prismatico convergente.

perchè formati internamente con superficie liscia, e esternamente con striature curve o prismatiche, che spandono i raggi luminosi in tutte le direzioni (Figg. 224-225).

132. **Rifrattori.** — I **rifrattori** sono involucri di vetro, solitamente a forma di globo, che circondano la lampada, con la superficie esterna ed interna scanalata con solchi prismatici, in direzione orizzontale e verticale, allo scopo di sparpagliare in tutte le direzioni i raggi luminosi che li attraversano. Essi cioè, hanno lo stesso ufficio dei riflettori prismatici, ma a differenza di questi agiscono sul flusso luminoso diretto in basso, cioè nella direzione della massima illuminazione. I riflettori, essendo formati di vetro trasparente, permettono di ottenere la diffusione della luce con minima perdita; questa si riduce infatti all'assorbimento minimo (5-8 %) per la non perfetta trasparenza del vetro. Diminuisce con questi rifrattori lo splendore della sorgente; invece del piccolo focolare luminoso vivo, si vede tutto il

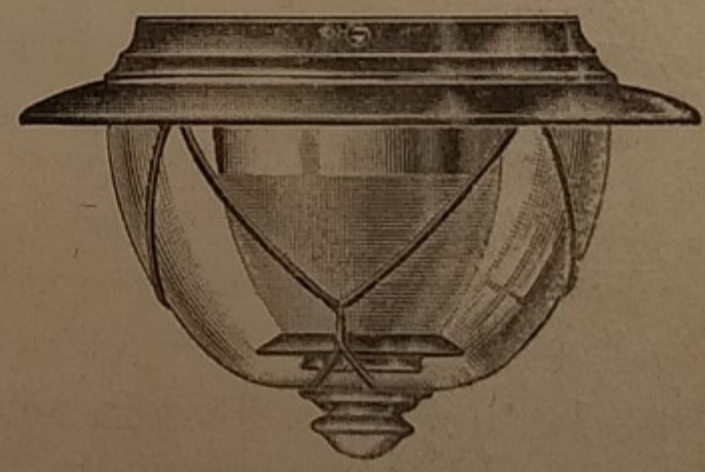


Fig. 226.
Globo interno rifrattore ed esterno chiaro per lampada a fiamma.

globo rifrattore luminoso, ma di splendore minore e quindi meno nocivo alla vista. Solitamente il globo rifrattore viene circondato da un altro globo diafano (chiaro) o diffusore (Figg. 226-227).

133. **Diffusori.** — I diffusori sono come i precedenti, ed hanno lo stesso ufficio di sparpagliare in tutte le direzioni i raggi luminosi diretti della sorgente; ma anzichè con mezzi diafani, lo scopo è raggiunto con mezzi traslucidi: *vetro smerigliato*, *vetro opalino*, ecc. La diffusione in questo modo è completa; ma l'assorbimento della luce è rilevante, potendo raggiungere con alcune qualità di vetro persino il 30 %. Per aumentare la diffusione si può dare alla superficie diffondente anche forma ondulata o a spicchi (Figg. 228-229).

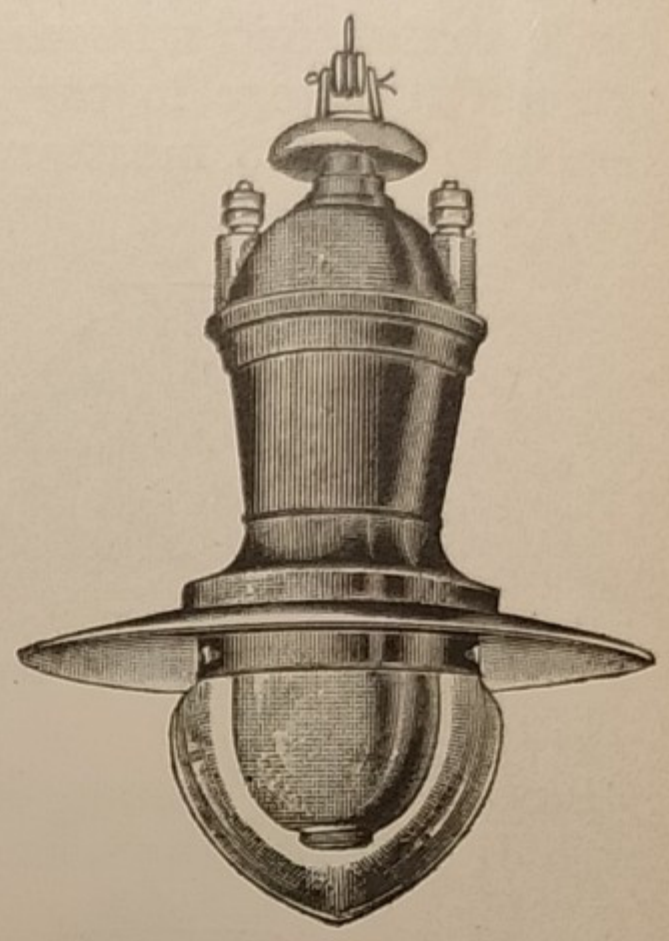


Fig. 227.
Lampada elettrica con rifrattore a coppa e globo esterno chiaro.

134. **Illuminazione indiretta e semi-diretta.** — Nella **illuminazione indiretta** il focolare luminoso non è visibile; la lampada è circondata da materiale opaco che ne riflette la luce verso altre superfici bianche (soffitto, muri, riflettori) che a loro volta la rimandano per diffusione. Questo è il sistema che va più specialmente diffondendosi per la illuminazione degli ambienti abitati e da spettacolo. Le lampade sono nascoste entro nicchie e vani praticati nelle pareti e negli angoli, e viene illuminata la parte vicina della parete, che forma così la superficie illuminante l'ambiente (Torino - Cinema Rex). Questa disposizione è la più adatta dal lato igienico; e si presta talvolta a bellissimi effetti decorativi; ma, come si comprende, è il sistema meno economico, poichè il rendimento totale non arriva in certi casi neanche al 30 %.

Fig. 228.
Lampada con diffusore ondulato.

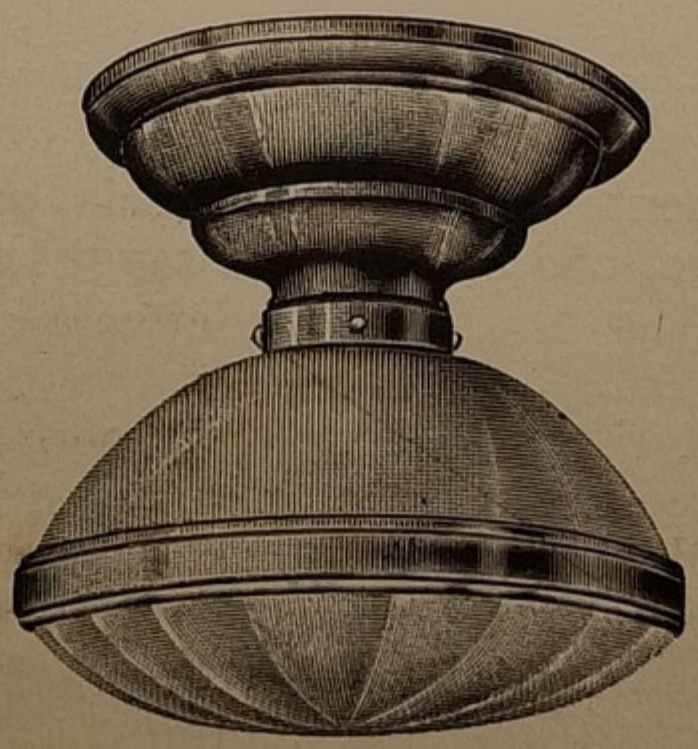


Fig. 229.
Lampada con diffusore a spicchi.

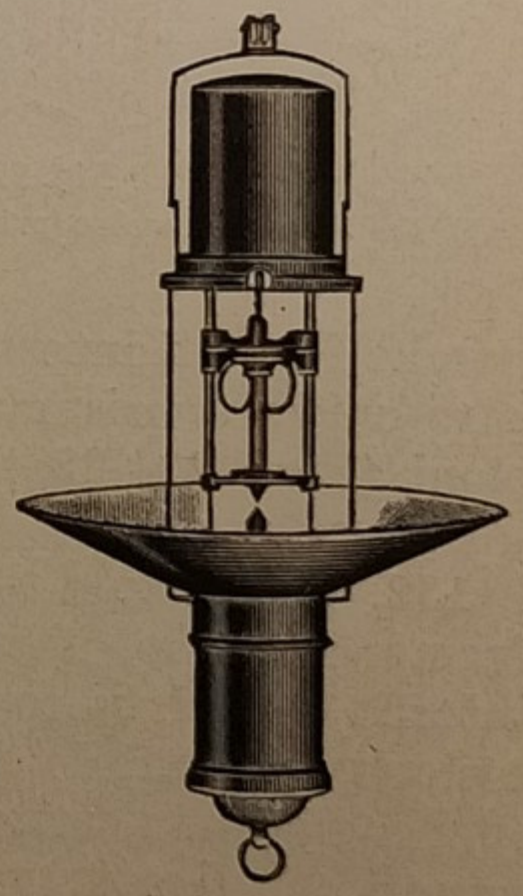


Fig. 230.

La Fig. 230 mostra una lampada ad arco per luce indiretta; la luce dell'arco, direttamente, o riflessa dal cono rovesciato inferiore (opaco) colpisce il soffitto, che la diffonde poi in basso.

Nella **illuminazione semi-diretta** si accoppiano i due sistemi precedenti; la maggior parte della luce della sorgente è rivolta verso il soffitto o altra superficie diffondente, da un riflettore sotto la lampada (Fig. 231) con la concavità verso l'alto; ma il riflettore è opalino, e quindi si lascia attraversare da parte della luce che lo colpisce (circa il 20 %), che illumina direttamente gli oggetti.

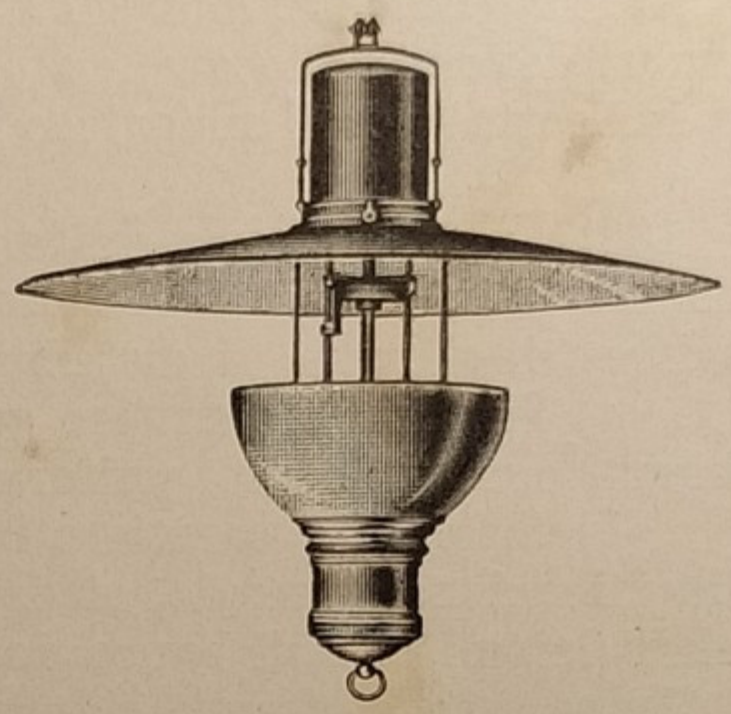


Fig. 231.

135. **Scelta del sistema di illuminazione.** — La scelta delle lampade è naturalmente soggetta al mezzo di cui si dispone per la produzione della luce; oramai però è così generalizzata l'illuminazione elettrica, anche nei piccoli paesi di campagna, che non si può parlare altro che di lampade elettriche. Ad ogni modo nella scelta del sistema di illuminazione, la guida è data dai tre requisiti principali che si richiedono:

a) *Coefficiente igienico:* Necessità di evitare gl'inconvenienti dovuti all'immissione nell'ambiente di prodotti nocivi alla respirazione, e studio del sistema migliore per evitare stanchezza della vista.

b) *Coefficiente estetico:* Uso di mezzi di illuminazione che armonizzino con la ricchezza della decorazione e con l'arredamento artistico del locale, e che anzi accrescano l'una e l'altro.

c) *Coefficiente economico:* cioè il costo orario dell'illuminazione.

Il primo requisito contempla anche la qualità della luce impiegata rispetto al colore più adatto per la vista. Naturalmente la tinta più gradevole e più igienica è quella della luce diurna diffusa; cioè quella che chiamiamo *luce bianca*. Le lampade a combustione emettono luce più ricca di colori verso il rosso, e con un massimo d'intensità per la luce gialla; mentre sono quasi prive di radiazioni verso il violetto. Le lampade elettriche invece sono quelle più vicine alla luce diurna; che però non raggiungono, perchè anch'esse difettano di radiazioni verso il violetto. Allorchè si esige una luce che non falsi i colori degli oggetti, come nelle tintorie, negozî di stoffe, sale di esposizione di quadri e di dipinti, studî di pittore, ecc., si ricorre alle **lampade solari**; cioè a lampade circondate da globi colorati in azzurro, i quali assorbendo in maggior proporzione i raggi meno rifrangibili dello spettro luminoso (rosso-aranciato-giallo) stabiliscono una proporzione di colori più vicina a quella della luce diurna. Questo mezzo è più specialmente praticato per le lampade elettriche ad incandescenza, nelle quali con tale vetro è costruito il bulbo che forma la lampada. Le lampade solari però assorbono circa il 40 % della luce prodotta dal filamento incandescente.

Il secondo requisito, sebbene possa raggiungersi anche coi più antichi mezzi di illuminazione (si pensi ai bellissimi lampadari a candele ancora esistenti in alcune chiese e in saloni di ricchi palazzi antichi) è certamente anch'esso soddisfatto dall'illuminazione elettrica, per la quale si costruiscono lampadari che sono veri gioielli di ornamentazione.

Il terzo requisito, oltre che nel confronto dei diversi sistemi di illuminazione, influisce per lo stesso sistema sull'intensità dell'illuminazione che si vuole raggiungere, cioè sul numero e sull'intensità luminosa delle lampade che si devono collocare, e sulla scelta dell'illuminazione più adatta (diretta o indiretta) per il maggiore rendimento di essa.

136. **Distribuzione delle lampade.** — Stabilito il sistema di illuminazione e l'intensità di illuminazione da raggiungere, occorre anche determinare il sistema di distribuzione da applicare. I sistemi sono due:

a) **Sistema a carattere generale,** quando si deve illuminare tutto l'ambiente con sufficiente uniformità.

b) **Sistema a carattere individuale,** quando, pur esistendo una debole illuminazione generale, si devono illuminare più intensamente punti speciali (lo scrittoio, il banco da lavoro, ecc.).

In ogni caso bisogna ridurre, anzi evitare, l'abbagliamento; quindi impedire la visione diretta della sorgente luminosa: mediante paralumi o riflettori opachi nell'illuminazione individuale, con l'uso di diffusori e disponendo le lampade ad altezza sufficiente, nell'illuminazione generale.

Nell'illuminazione a carattere generale, collocare le lampade fuori dell'angolo visivo, ed evitare le riflessioni di superfici lucide (pareti di marmo, vetrate, specchi, mobili lucidi, ecc.). Non si deve concentrare la sorgente luminosa in un unico focolare; perciò è sempre preferibile suddividere le lampade nel maggior numero possibile (cioè diminuire l'intensità di ciascuna lampada ed aumentarne il numero), e collocarle a distanze eguali lungo le pareti e più in alto che si può; maggior è il numero delle unità illuminanti, più si riducono le ombre degli oggetti, poichè la luce arriva a questi da varie direzioni. A questo scopo le migliori condizioni si raggiungono con le disposizioni più recenti di illuminazione indiretta, e coi *soffitti luminosi* in cui si forma in tutto o in parte del soffitto un piano sottostante di vetro diffusore, e si collocano nell'intercapedine le lampadine, anche ora di piccola intensità ma in numero più grande che si può. In ogni caso, anche coi lampadari centrali si applichi la suddivisione delle lampadine, e si faccia uso di lampadine a vetro smerigliato od opalino.

Nell'illuminazione individuale, come ad es. per illuminare lo scrittoio, evitare di collocare la lampada al di sopra del tavolo, o davanti a chi scrive; in entrambi i casi la carta riflette verso l'occhio la luce e ne deriva l'abbagliamento. Non è adatta neanche la posizione laterale a destra, perchè l'ombra proiettata sulla carta ostacola la visione della scrittura. La lampada va perciò collocata a sinistra, più bassa che si può, ed orientata nella migliore maniera per raggiungere l'illuminazione più conveniente. Per quest'ultimo scopo, si ricorre a lampade con attacco snodato, che permettono di piegare in qualunque direzione l'insieme della lampadina e del suo paralume o riflettore. In ogni caso è consigliabile l'uso di lampadine con globetto smerigliato od opalino, che diffondono assai meglio la luce.

Per l'illuminazione delle scale si dispongano le lampade in posizione tale che si vedano i singoli gradini. Per i negozi ottenere l'illuminazione dei vari scompartimenti, e nei negozî di lusso applicare l'illuminazione semidiretta o indiretta, nascondendo le lampade dietro schermi laterali; ciò specialmente è richiesto per l'illuminazione delle vetrine. Nei locali industriali,

si abbiano pareti bianche (non lucide) e si collochino lampade con diffusore. L'illuminazione stradale fin'ora è quasi generalmente diretta con riflettori. S'incomincia però anche in questo caso ad applicare lampade con diffusore; sia adoperando lampadine con globo opalino (Torino, illuminazione di via Po), sia con lampade a riflettore cilindro-parabolico, chiuse da vetro diffusore di larga superficie (circa 20 dm^2; Torino, illuminazione di Corso Vittorio Emanuele).

Infine, si diffonde l'illuminazione esterna di edifizi, monumenti, ecc., per mezzo di *proiettori-diffusori* disposti opportunamente sui tetti delle case che stanno di contro all'edifizio da illuminare; questo viene illuminato uniformemente e senza ombre intense, conservando la visione architettonica della luce diffusa del giorno.

Le modalità dell'impianto, il tipo, la sezione, la disposizione delle condutture di alimentazione, il raggruppamento delle lampade nei vàrî circuiti di controllo, ecc., fanno parte di altre branche della tecnica, e perciò evitiamo ora di parlarne.

PARTE V.

ELETTRICITÀ E MAGNETISMO

MAGNETOSTATICA

Magneti permanenti.

137. **Magneti.** — Vi sono dei corpi che hanno la proprietà di attirare pezzetti di *ferro*; si chiamano **magneti** o **calamite,** e si chiama **magnetismo** la causa incognita di questo fenomeno. Si noti che il magnetismo non è materia; poichè una calamita prima di essere magnetizzata ha esattamente lo stesso peso che dopo. Vedremo in seguito quali sono le vedute odierne sulla natura del magnetismo (§ 299).

Fig. 232.

Fig. 233.

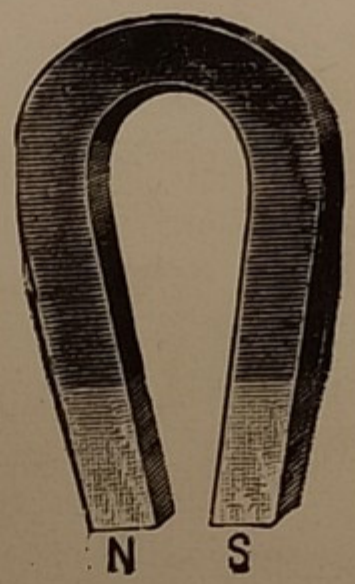


Fig. 234.

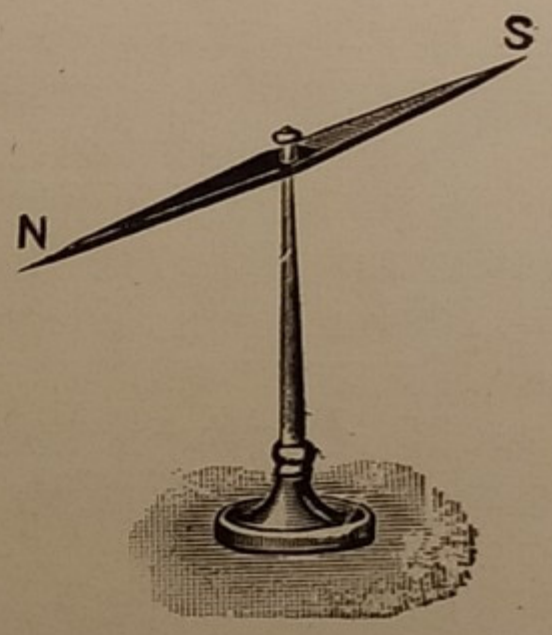


Fig. 235.

Vi sono **magneti naturali,** cioè che si trovano in natura; sono formati di *magnetite* (ch'è un ossido di ferro Fe_3O_4), abbondante anche in Italia, specialmente nell'isola d'Elba. La Fig. 232 ne rappresenta un pezzo; i fiocchetti neri rappresentano granelli di limatura di ferro che vi aderiscono.

Vi sono meglio **calamite artificiali,** formate di acciaio temperato e calamitato o con lo strofinìo con altre calamite, o con la corrente elettrica, come studieremo in seguito. Esse hanno solitamente la forma di una sbarra rettilinea (Fig. 233), o **a ferro di cavallo** (Fig. 234), o di una sottile losanga allungata, girevole su una punta che la sostiene; questa si chiama l'**ago magnetico,** ed è rappresentato nella Fig. 235.

138. **Poli magnetici - Azioni fra di essi.** — Immergiamo una sbarra calamitata nella limatura di ferro; questa non è attratta nella parte centrale, ma aderisce specialmente alle estremità, che si chiamano i **poli** (Fig. 236).

Sospendiamo un ago magnetico sulla punta del suo sostegno in modo che sia libero di girare; vedremo ch'esso, dopo qualche oscillazione, finisce sempre a fermarsi in una data direzione, ch'è approssimativamente dal nord al sud; spostato da tale direzione vi ritorna nuovamente. Ma vedremo che solo uno dei poli si dirige al nord; capovolgendo l'ago ritorna nuovamente da sè come prima. Dunque i due poli sono diversi; li distinguiamo col nome: *polo nord* (*N*) quello che si rivolge a nord, e *polo sud* (*S*) quello che si rivolge a sud.

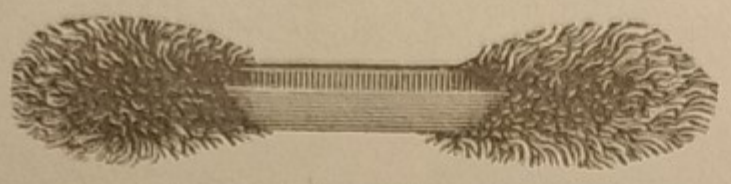


Fig. 236.

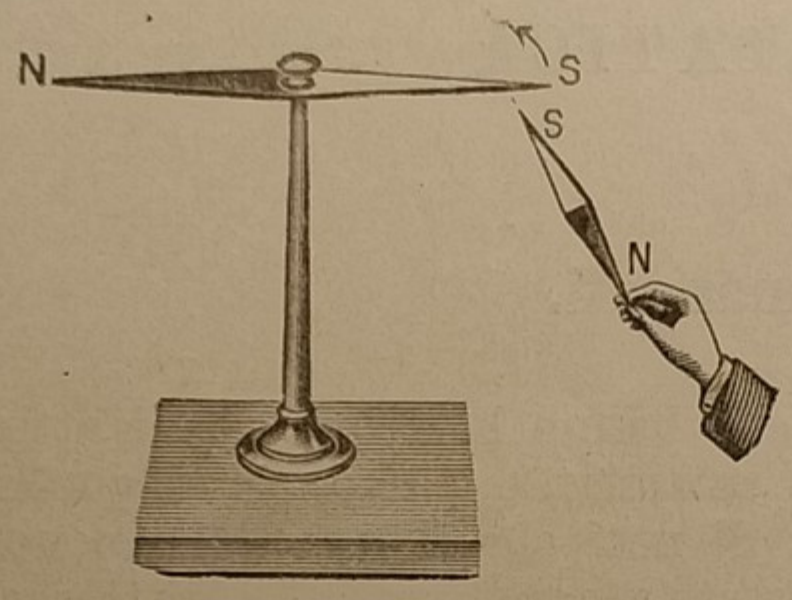


Fig. 237.

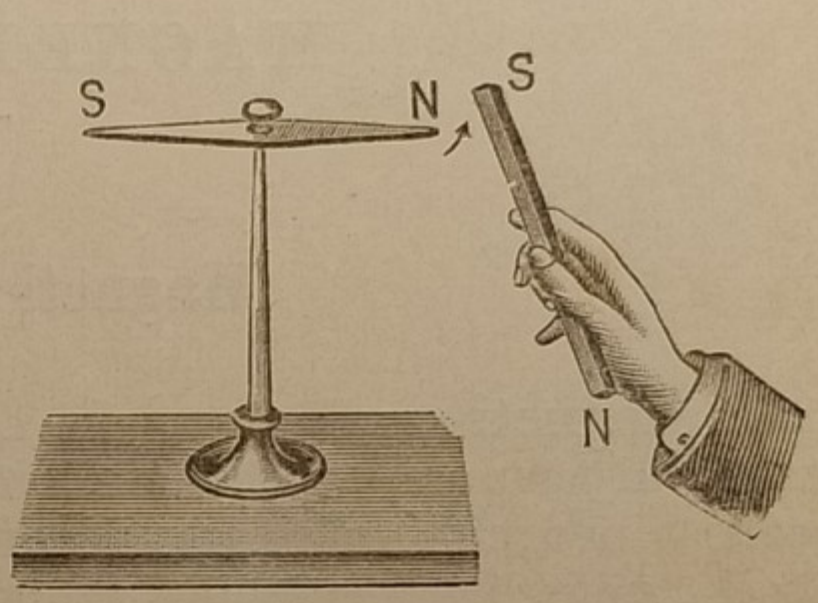


Fig. 238.

Accostiamo il polo Sud di un ago al polo Sud di un altro; essi si respingono (Fig. 237); così pure avviene se si avvicinano due poli Nord; dunque:

Poli dello stesso nome si respingono.

Avviciniamo ora il polo Sud di un ago al polo Nord di un altro; essi si attirano (Fig. 238); dunque:

Poli di nome contrario si attraggono.

139. **Legge di Coulomb - Unità di magnetismo.** — Il magnetismo è una grandezza suscettibile di misura; cioè è *una quantità* esprimibile con un numero.

Coulomb, con l'esperienza, misurò la forza con cui si attirano o si respingono due poli magnetici; egli trovò che:

La forza con cui si attirano o si respingono due poli (puntiformi) *magnetici, è direttamente proporzionale alle quantità di magnetismo che risiedono nei poli, ed inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza.*

È questa la **legge di Coulomb,** che si può scrivere con la formula:

$$1) \qquad F = \pm h \frac{m\, m'}{r^2},$$

in cui F è la forza, m ed m' le quantità di magnetismo che risiedono nei poli, r la loro distanza (supposti due punti); m ed m' si assumono col segno + se sono poli Nord, col segno — se sono poli Sud. Il segno + nella 1) si ha nel caso in cui m ed m' siano dello stesso segno, cioè i poli siano dello stesso

nome; quindi nel caso della repulsione; il segno — nel caso che m ed m' siano di segno opposto, cioè i poli siano di nome contrario; quindi nel caso dell'attrazione.

Nella 1) il coefficiente di proporzionalità h, dipende dalla natura del mezzo interposto fra i due poli; si assume eguale ad 1 per il vuoto e sensibilmente per l'aria, ove ordinariamente stanno i due poli.

Dalla 1) si ricava che è: $m = 1$ se anche $m' = 1$, $F = 1$, $r = 1$, ed $h = 1$; cioè:

L'unità (assoluta) di magnetismo è quella che posta nel vuoto, ad un centimetro di distanza da una quantità eguale, esercita su di essa l'azione di una dine. Essa è anche unità pratica e non ha nome.

Le quantità di magnetismo risiedenti nei due poli di una calamita, sono sempre eguali e di segno contrario. Il grado di magnetizzazione di un polo dipende dalla quantità di magnetismo che vi risiede, e si chiama anche **l'intensità del polo.**

Problema. — *A quale distanza deve collocarsi un polo Nord, la cui intensità magnetica è di 120 unità, perchè sia attratto da un polo Sud di 175 unità con la forza di g.15?*

Soluzione. — Si applicherà la 1) in cui si ponga:

$F = \text{g.}15 = (15 \times 980)$ dine $= 14\,700$ dine (Vol. 1° - § 85); $m = 120$; $m' = 175$; e si ha:

$$14\,700 = \frac{120 \times 175}{r^2} \qquad \text{da cui:} \qquad r = \text{cm.}\sqrt{\frac{120 \times 175}{14\,700}} = \textbf{cm. 1,2} \text{ circa.}$$

140. **Campo magnetico.** — Si chiama *campo magnetico di un polo, la regione dello spazio entro cui esso fa risentire la sua azione magnetica.*

L'azione magnetica di un polo m è misurata dalla 1); essa pertanto si annulla o per $m = 0$, o per $r = \infty$; escludendo il primo caso che vorrebbe dire che non vi è magnetismo sul polo, concluderemo che l'azione magnetica di un polo si estende sino all'infinito. Ciò in teoria; in pratica essa si estende fin dove è possibile rivelarla; p. es., fin dove un ago magnetico devia sotto la sua influenza; cioè si riduce a pochi metri di distanza per un polo di una calamita ordinaria. Come vedremo però (§ 152), l'ago calamitato può risentire l'influenza del magnetismo del Sole.

Si chiama **intensità del campo** in un punto di questo, la forza che agisce su l'unità di magnetismo, posta in quel punto.

Unità di intensità è quella di un campo che esercita l'azione di una dine su l'unità di magnetismo; tale unità si chiama **gauss.**

Si chiamano **linee di forza,** le linee secondo cui si esplica l'azione magnetica. Cioè se consideriamo un punto materiale magnetizzato, libero di muoversi nello spazio e non soggetto ad altre forze, esso si muoverà in un campo magnetico secondo una traiettoria, che è una linea di forza.

Se l'azione è dovuta ad un solo polo (considerato come un punto), le linee di forza sono tutti i raggi uscenti da quel punto. Ma non vi è calamita con un polo solo, nè calamita con due poli dello stesso nome; nel caso comune di un magnete coi due poli di nome contrario, le linee di forza non sono più rettilinee.

Siano infatti A e B (Fig. 239) i due poli (A il Nord, B il Sud); un polo Sud C è attratto da A nella direzione CA e respinto da B nella direzione BC;

se C è equidistante da A e B, queste due forze sono di eguale intensità e possiamo rappresentarle coi vettori CM e CN; la loro risultante è CR (Vol. 1° - § 54). La linea di forza in C sarà nella direzione della forza CR, cioè avrà CR per tangente.

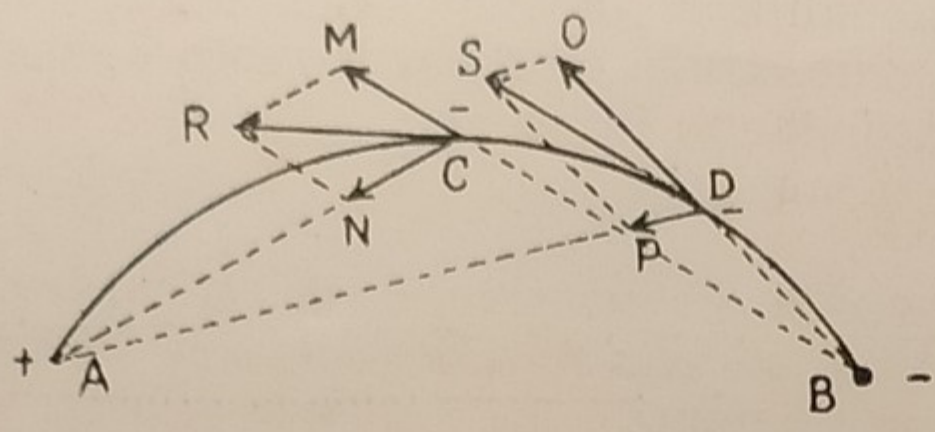


Fig. 239.

Ripetendo la stessa considerazione in un punto D, più vicino a B che ad A, la forza di ripulsione DO di B supera quella di attrazione DP di A, e la linea di forza sarà diretta secondo la risultante DS; avrà cioè DS per tangente. Come è chiaro allora, la linea di forza sarà una curva, come è rappresentata nella Fig. 239.

Nel caso di due poli di nome contrario, le linee di forza sono pertanto linee curve, che passano per i due poli.

141. **Spettri magnetici.** — Possiamo del resto rendere visibili queste linee di forza con la seguente esperienza.

Sui poli Nord e Sud di una calamita si poggia un foglio di carta, teso su un telaio, e su di essa si sparge un po' di limatura di ferro: se ne agevola

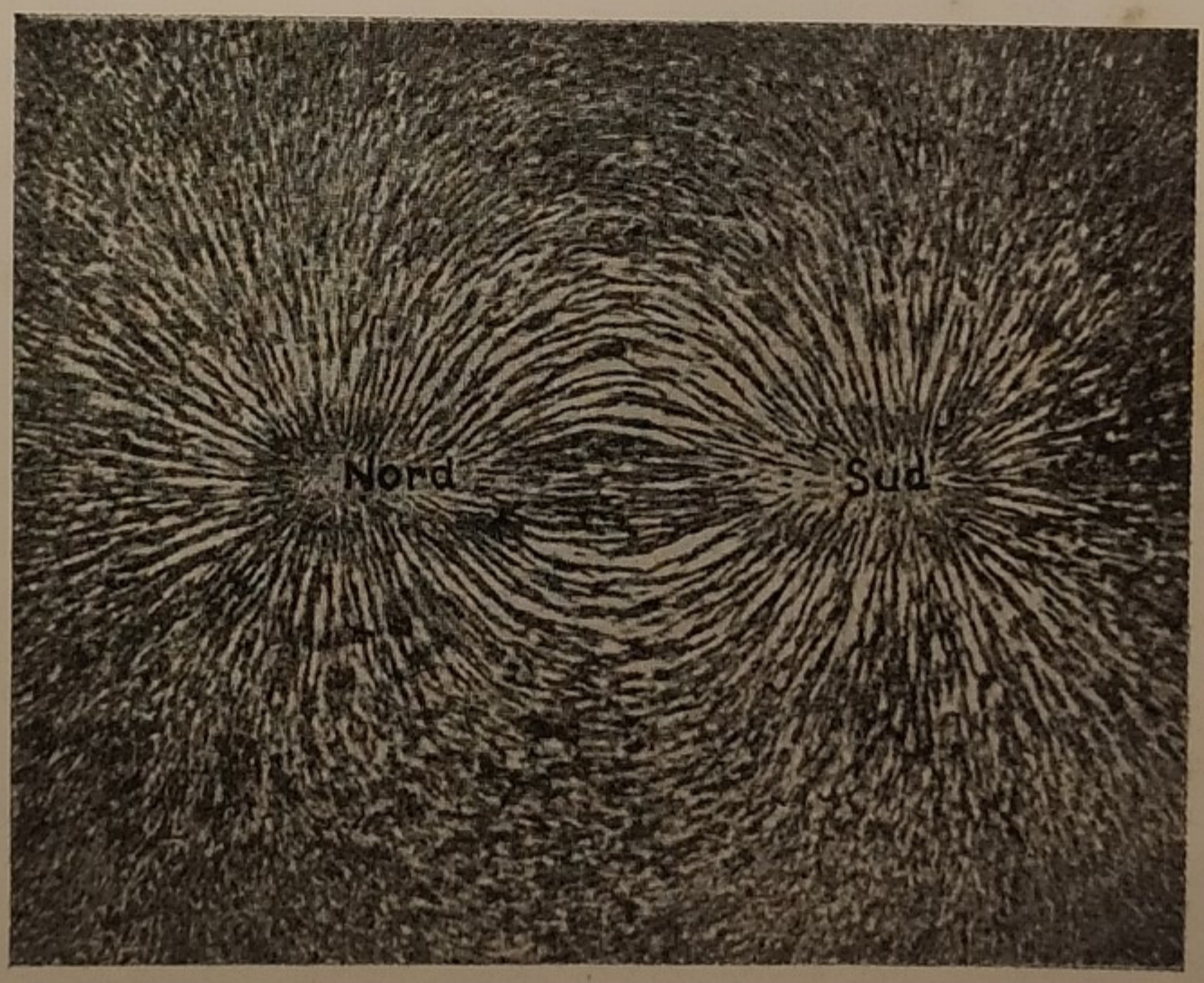


Fig. 240.

l'orientamento dando col dito leggeri colpi sulla carta. Si vedrà la limatura disporsi secondo linee curve, come mostra la Fig. 240, che sono appunto le linee di forza. Le figure ottenute in questo modo hanno il nome di **spettri magnetici.**

Le linee di forza adunque sono curve che uniscono i due poli; si *conviene* che esse partano dal polo Nord e vadano verso il Sud.

Chiamasi **flusso di forza** l'insieme delle linee di forza che attraversano una data superficie del campo. Quindi: l'**intensità del campo** *in un punto è il flusso di forza che attraversa l'unità di superficie, perpendicolare alle linee di forza, contenente quel punto.*

Se una superficie s è posta in un campo d'intensità H, perpendicolarmente alle linee di forza, il valore del flusso che attraversa s è manifestamente:

$$2) \qquad \Phi = Hs\,.$$

Dalla 2) si ricava che è: $\Phi = 1$ per $H = 1$ ed $s = 1$; cioè: *l'unità di flusso è quello di 1 gauss per* cm^2; si chiama il **maxwell.**

Si chiama **direzione del campo** in un punto, la direzione (cioè la tangente) della linea di forza in quel punto.

Campo magnetico uniforme è quello in cui le linee di forza sono rette parallele. Teoricamente si ottiene un tal campo da un solo polo magnetico infinitamente lontano. Praticamente, se le superfici terminali dei poli sono due piani paralleli vicini, nella parte centrale di questi il campo si può ritenere uniforme, (Fig. 241).

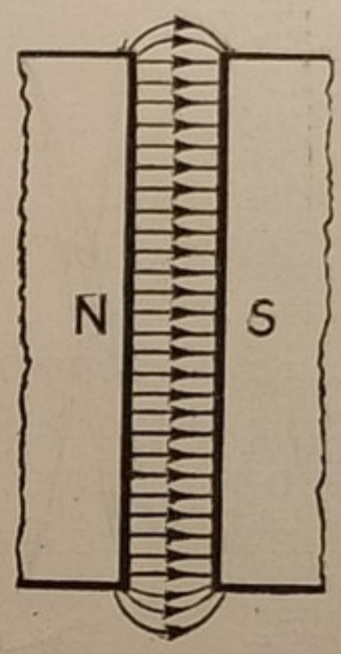


Fig. 241.

Nel senso geometrico, per ogni punto dello spazio dovrebbe passare una linea di forza, ed il flusso di forza dovrebbe essere in ogni caso infinito. Tuttavia, nel senso fisico, *conveniamo* che il numero delle linee di forza che attraversano una data superficie, sia limitato, e proporzionale all'intensità del campo in quel punto (§ 140); usualmente si conviene che: *l'intensità del campo in un punto ed il flusso di forza che attraversa normalmente l'unità di superficie contenente quel punto, siano espressi dallo stesso numero.*

142. **Momento della calamita.** — Si chiama **lunghezza della calamita,** *la distanza tra i suoi due poli, supposti due punti*; **asse magnetico** è la retta che unisce tali poli.

Ponendo una calamita in un campo magnetico uniforme, i suoi poli sono sollecitati da forze, proporzionali all'intensità magnetica di essi, e nella direzione del campo. L'esperienza dimostra che una calamita, libera di muoversi in un campo uniforme (ad es., come in § 151, Fig. 257), riceve un moto di rotazione ma non di traslazione. Cioè le forze agenti sui due suoi poli, costituiscono una coppia (Vol. 1° - § 61), e perciò sono parallele, eguali e contrarie. Quindi devono pure essere uguali e di segno contrario le intensità magnetiche dei due poli.

Chiamasi **momento magnetico** della calamita il prodotto dell'intensità m di un suo polo, per la lunghezza l della calamita stessa:

$$3) \qquad \mathfrak{M} = m\,l\,.$$

Esso equivale al momento della coppia agente sulla calamita, in un campo uniforme di intensità *uno*, allorchè l'asse magnetico della calamita è perpendicolare alle linee di forza.

Ricordando qual'è l'effetto di una coppia (Vol. 1° - § 61), si ricava facilmente che: *un ago calamitato, posto in un campo magnetico uniforme, ruota finchè il suo asse magnetico si dispone nella direzione del campo.*

143. **Esperienza della calamita spezzata.** — L'attrazione della limatura solo ai poli di un magnete, potrebbe far pensare che il magnetismo risieda solo in quei punti. Invece è l'azione magnetica limitata ai poli; ma di magnetismo nella calamita ve n'è in ogni punto. Ciò si dimostra con la seguente esperienza:

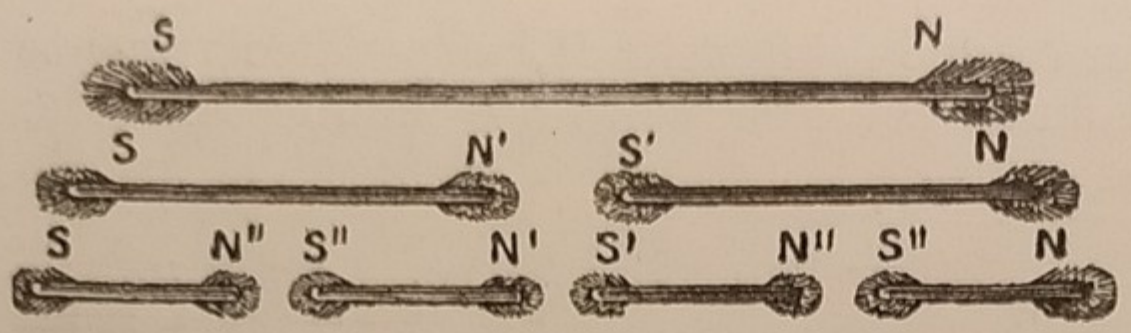


Fig. 242.

Si prende una calamita e si verifica che nel mezzo non attira la limatura; indi si spezza in mezzo, (Fig. 242). I due pezzi non rimangono ciascuno con un polo solo, il che non può essere (§ 140); ma vediamo che nei punti di rottura si formano due nuovi poli N' ed S', in modo che ciascuno dei due pezzi della calamita è *una calamita completa*, coi suoi due poli contrarî.

Ciò avviene qualunque sia il numero dei pezzi, anche piccolissimi, in cui si rompe la calamita; perciò concludiamo che in una calamita tutte le molecole sono magnetizzate. Esse sono orientate in modo che tutti i poli Nord sono rivolti verso un estremo della calamita, i poli Sud verso l'altro estremo (Fig. 243). Nei punti intermedi sono affacciati poli Nord e Sud di molecole adiacenti e le loro azioni si elidono; restano i poli estremi delle molecole vicine alle estremità, che formano i poli N ed S della calamita. Le molecole magnetizzate si chiamano i **magneti elementari.**

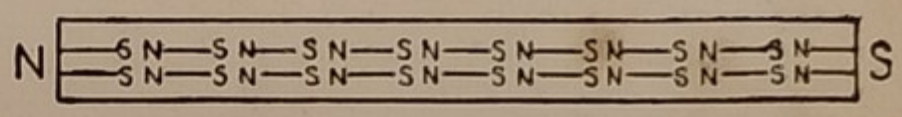


Fig. 243.

Solenoide è una serie di molecole magnetizzate, allineate con i poli contrarî vicini. Equivale ad un filo magnetizzato sottilissimo, avente i poli esattamente alle estremità.

Foglietto o lamina magnetica è un insieme di magneti elementari, disposti su un piano, in modo che tutti i poli Nord siano su una faccia del piano e i poli Sud sull'altra. Equivale ad un foglio magnetizzato sottilissimo, avente i poli sulle due facce.

144. **Induzione magnetica.** — Sia N un polo, ad es. Nord, di una calamita; poniamo vicino ad esso un pezzo di ferro o di acciaio F; questo si magnetizza per l'**induzione** di N e si forma nel punto più vicino un polo S' di nome contrario al polo N inducente, e nel punto più lontano un polo N' dello stesso nome, (Fig. 244).

Allontanando il polo inducente, se F è di *ferro dolce* (1) si smagnetizza completamente; il ferro dolce forma cioè una **calamita temporanea.** Se invece F è un pezzo di acciaio temperato, rimane magnetizzato anche dopo allontanato dalla calamita inducente; si ha cioè un **magnete permanente.**

Essendo impossibile avere in pratica ferro perfettamente puro, rimane anche nel ferro un po' di magnetismo, che si chiama il **magnetismo residuo.**

---

(1) Si chiama *ferro dolce* il ferro puro; i metalli puri sono più teneri, più pieghevoli, che quelli impuri. L'acciaio è ferro contenente piccola quantità di altre sostanze, e specialmente di carbonio.

Se anche al polo N' avviciniamo un altro pezzo di ferro, si magnetizza anch'esso per induzione; e così via, possiamo formare una catena di magneti temporanei (Fig. 245); all'ultimo vi può ancora aderire un fiocchetto L di limatura. Staccando però da N il primo

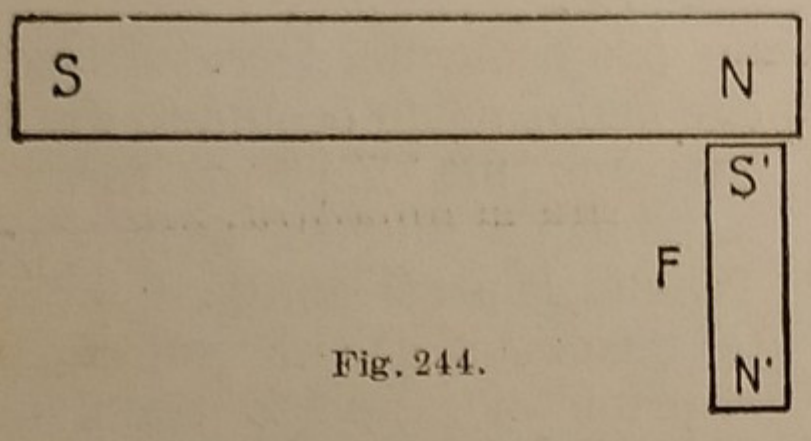


Fig. 244.

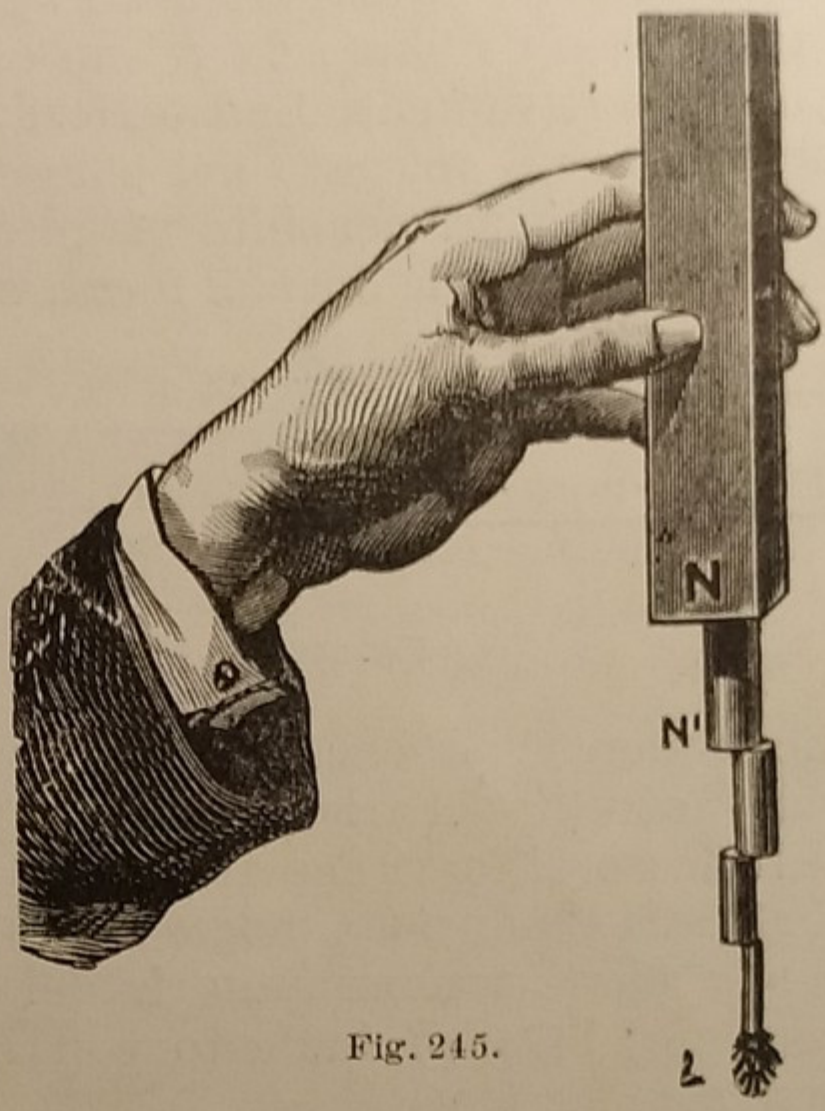


Fig. 245.

pezzo di ferro, tutti gli altri pezzi si smagnetizzano contemporaneamente, e la catena si rompe in ogni punto.

Una vecchia ipotesi per spiegare il diverso comportamento del ferro e dell'acciaio è la seguente: Ammettiamo che qualunque pezzo di ferro o di acciaio abbia già tutte le molecole magnetizzate; ma queste sono disorientate, cioè disposte alla rinfusa e rivolte in tutte le direzioni, in modo che in ogni punto siano affacciati poli opposti di molecole diverse, le cui azioni si elidono. L'azione magnetica del pezzo all'esterno è nulla, ed esso non forma calamita.

Sotto l'azione di un polo inducente N tutte queste molecole o magneti elementari girano e si dispongono tutti in modo da rivolgere verso N i loro poli Sud e dalla parte opposta i poli Nord; cioè essi si orientano come nella Fig. 243 e formano una calamita.

Se il pezzo è di ferro dolce, allontanando il polo inducente cessa la causa che orientava le molecole; queste spinte da una causa ignota, si disorientano nuovamente, ritornano alla rinfusa alla posizione primitiva, e il corpo si smagnetizza. Se il pezzo è di acciaio invece, le molecole non possono disorientarsi nuovamente, poichè vi è *qualcosa* che impedisce loro di ritornare alla posizione primitiva; è come se le molecole fossero immerse in un mezzo vischioso in cui non possano muoversi agevolmente; onde al cessare dell'azione inducente le molecole sono ostacolate nel loro movimento, e non si disorientano più. Il pezzo rimane quindi magnetizzato.

Questa forza che impedisce alle molecole di disorientarsi, si chiama la **forza coercitiva.** Naturalmente essa ostacola dapprima l'induzione; ma è vinta dall'azione energica del polo inducente. Cioè un pezzo di acciaio per induzione si magnetizza con più difficoltà e meno intensamente che un pezzo di ferro dolce; ma poi conserva gran parte del magnetismo acquistato.

145. **Permeabilità magnetica.** — Spieghiamo agevolmente il fenomeno dell'induzione magnetica, con la proprietà che hanno il ferro e l'acciaio di lasciarsi attraversare facilmente dalle linee di forza; in modo che le linee di forza che escono da un polo inducente N (Fig. 246) piegano

verso il pezzo di ferro indotto F, si dirigono verso di esso perchè vi trovano una via più facile che non nell'aria, si raggruppano in gran numero nell'interno di esso, lo attraversano ed escono poi da N'. In S' dunque entrano molte linee di forza, da N' ne escono altrettante: cioè S' ed N' sono due poli rispettivamente Sud e Nord, ed il pezzo di ferro forma una calamita, nel modo già spiegato nel paragrafo precedente.

Si chiama **permeabilità magnetica** questa proprietà del ferro di lasciarsi attraversare dalle linee di forza; in modo che nello spazio occupato dal ferro passano più linee di forza che altrimenti non vi passerebbero. Meglio, la **permeabilità** di un corpo è misurata da un numero, che esprime il rapporto tra il flusso di forza che passa attraverso una data sezione del corpo, perpendicolarmente ad essa, ed il flusso che passerebbe per la stessa sezione, nel vuoto (o nell'aria), se non vi fosse il corpo.

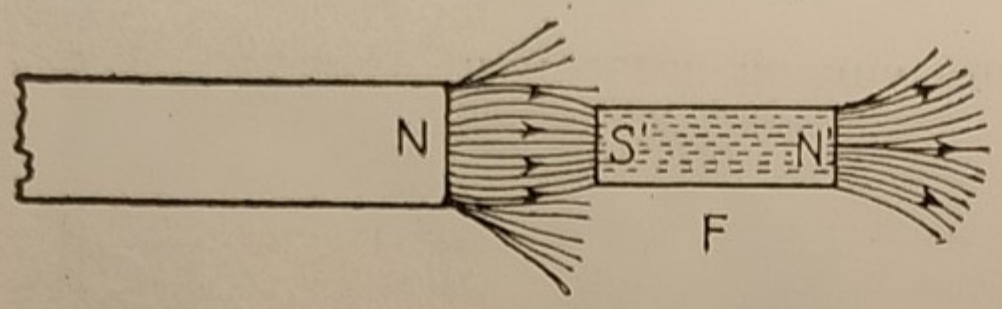


Fig. 246.

Il flusso di forza che attraversa normalmente l'unità di sezione del corpo, si chiama l'**induzione magnetica,** e s'indica con B; il flusso di forza che passa per la stessa sezione unitaria del campo l'abbiamo chiamato l'**intensità del campo** (§ 141) ed indicato con H; la *permeabilità magnetica* μ è perciò espressa da:

4) $\mu = \frac{B}{H}$; ed è l'inversa del coefficiente h che compariva nella legge di Coulomb (§ 139).

Il valore della permeabilità dell'aria è quindi l'unità; per le migliori qualità di ferro raggiunge 1500, nell'acciaio 1700, nel nichel 80; per gli altri corpi è molto vicina all'unità. La permeabilità cioè, oltre che dalla qualità della sostanza, dipende anche dalla sua crudezza, dalla temperatura, e dall'intensità del campo.

Si chiamano **ferromagnetici** i corpi la cui permeabilità è molto grande; tali sono: il *ferro*, il *nichel* e in genere i corpi che possono magnetizzarsi.

Si chiamano **paramagnetici** i corpi la cui permeabilità è maggiore di uno; tali sono: il *cobalto*, il *manganese*, l'*ossigeno*, ecc.

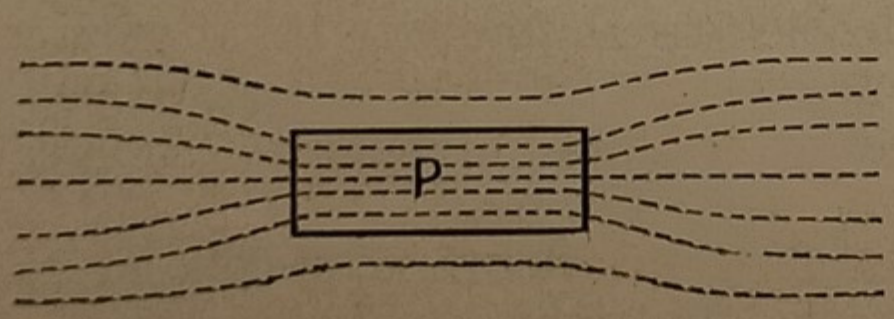


Fig. 247.

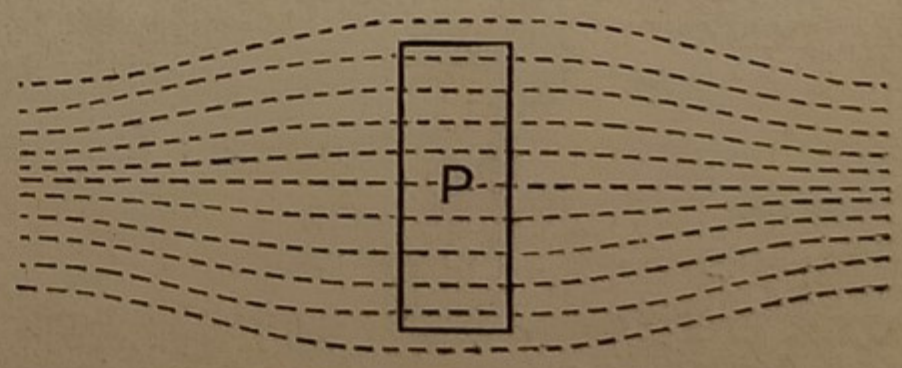


Fig. 248.

Si chiamano **diamagnetici** i corpi la cui permeabilità è minore di uno; tali sono: il *bismuto*, l'*antimonio*, lo *zinco*, l'*acqua*, l'*alcool*, ecc. Il *sangue*, quantunque contenga sali di ferro, è diamagnetico, per la predominanza dell'acqua.

Una sbarretta P di sostanza paramagnetica libera di muoversi in un campo magnetico, si dispone nella direzione delle linee di forza (Fig. 247); se invece è di sostanza diamagnetica, si dispone perpendicolarmente al campo (Fig. 248).

146. **Fatti dipendenti dall'induzione.** — Con l'induzione si spiega perchè un polo magnetico attira un pezzo di ferro. Per la legge di Coulomb non può esservi attrazione se non fra due poli m ed m'; non potrebbe esservi attrazione di un pezzo di ferro, se su questo non vi fosse un altro polo magnetico. Ora questo vi si forma per l'induzione del primo; e si forma appunto nel punto più vicino un polo di nome opposto, che così è attratto.

Una calamita non attira un pezzo di rame o di pietra, o di altri corpi che non siano di ferro, perchè in essi non vi è induzione sensibile, e non può formarsi il polo da attrarre.

Si spiega anche un altro fenomeno che va sotto il nome di **paradosso magnetico.** Accostando il polo Nord di una calamita al polo Nord di un ago magnetico, questo è respinto finchè i due poli sono alquanto lontani. Se invece si mettono solo alla distanza di uno o due millimetri, il polo dell'ago *è attratto*, contrariamente alla legge del § 138; da ciò deriva il nome di *paradosso*. La spiegazione dipende dal fatto che per l'induzione del polo della calamita, si forma sull'estremità vicina dell'ago un polo di nome contrario (Sud), di intensità maggiore del polo Nord ivi esistente; prevale quindi l'attrazione di tale polo Sud.

147. **Schermo magnetico.** — Mettendo avanti ad un polo magnetico N una lastra di rame L (Fig. 249) o di cartone, ecc., questa non sposta sensibilmente la direzione delle linee di forza. Al di là della lastra arriva così il flusso di forza come se essa non vi fosse; un pezzo di ferro P subisce l'induzione di N e ne è attratto, come quando non vi è interposta la lastra L.

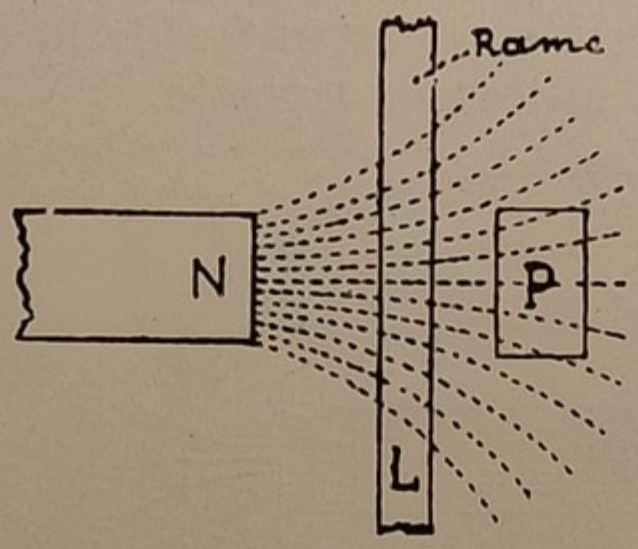


Fig. 249.

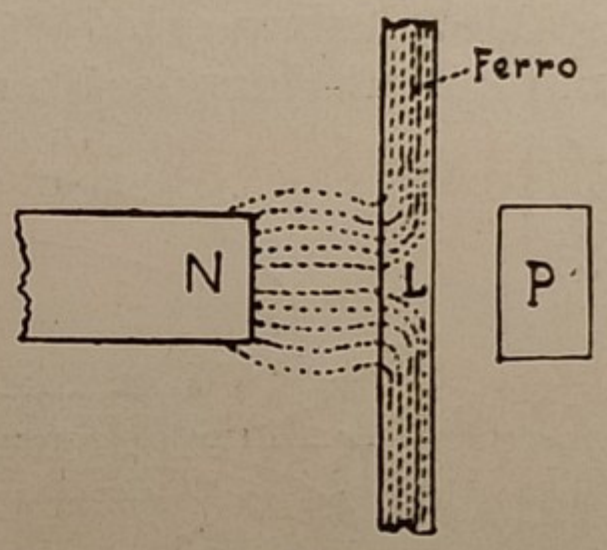


Fig. 250.

Se invece la lastra è di ferro, per la permeabilità magnetica di questo le linee di forza uscenti da N si dirigono su L (Fig. 250); ma non escono dall'altra parte, essendo per esse più agevole spandersi dentro la lastra. In P quindi non arriva più alcuna linea di forza, ed esso non risentendo più l'azione di N non è attratto.

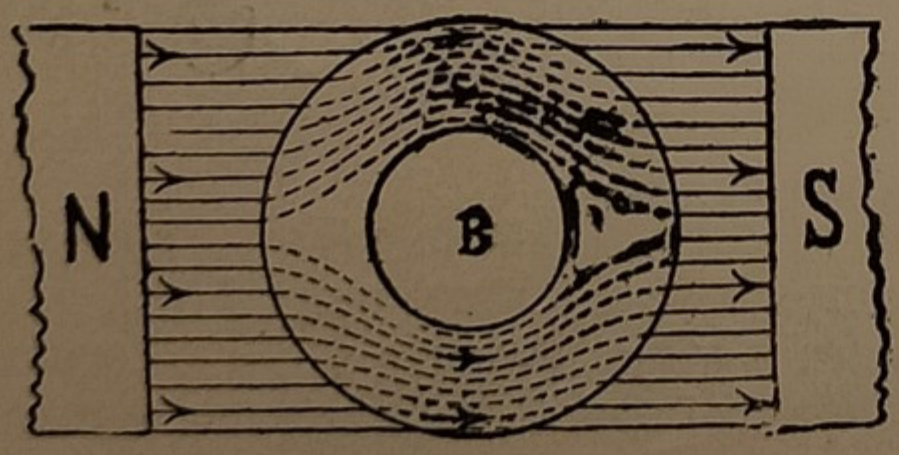


Fig. 251.

Analogamente, mettiamo fra i poli N ed S di una calamita un involucro di ferro con una cavità B all'interno (Fig. 251). Anche ora le linee di forza convergono dentro il ferro e lo attraversano senza abbandonarlo; cioè non escono nella cavità B, e dentro questa non vi è azione magnetica. Si ha così il modo di preservare un certo spazio dall'azione di una calamita, per quanto potente, e si ottiene uno **schermo magnetico.**

148. **Magnetizzazione e conservazione delle calamite.** — *Per magnetizzare* una sbarra d'acciaio, basta sottoporla all'induzione di una calamita. Per operare più rapidamente, si strofina la sbarra F da magnetizzare con un polo N di una calamita, per molte volte, *sempre nello stesso senso* (Fig. 252); cioè sollevando il polo N dalla sbarra quando si deve tornare indietro. Si forma in F un polo opposto ad N all'estremità s che si abbandona allorchè si solleva N.

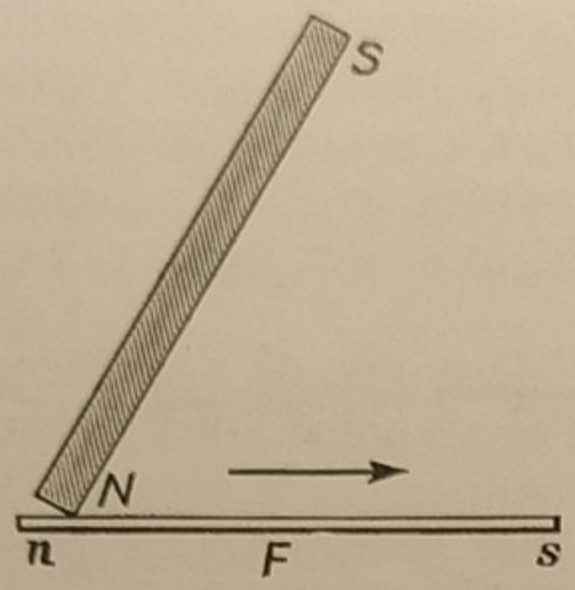


Fig. 252.

Questo metodo si chiama del **semplice contatto.** Ve ne sono altri; ma sorvoliamo su questo argomento, perchè ormai la magnetizzazione si ottiene più rapidamente e più intensamente ricorrendo alla corrente elettrica; come studieremo in seguito.

Le proprietà magnetiche del ferro sono molto modificate attorno alla temperatura di 750°. Una sbarra calamitata portata a tale temperatura perde il suo magnetismo e non lo riprende quando è ritornata fredda. Il ferro riscaldato sopra ai 750°, non è più attratto dalle calamite; raffreddandosi torna ad essere attratto.

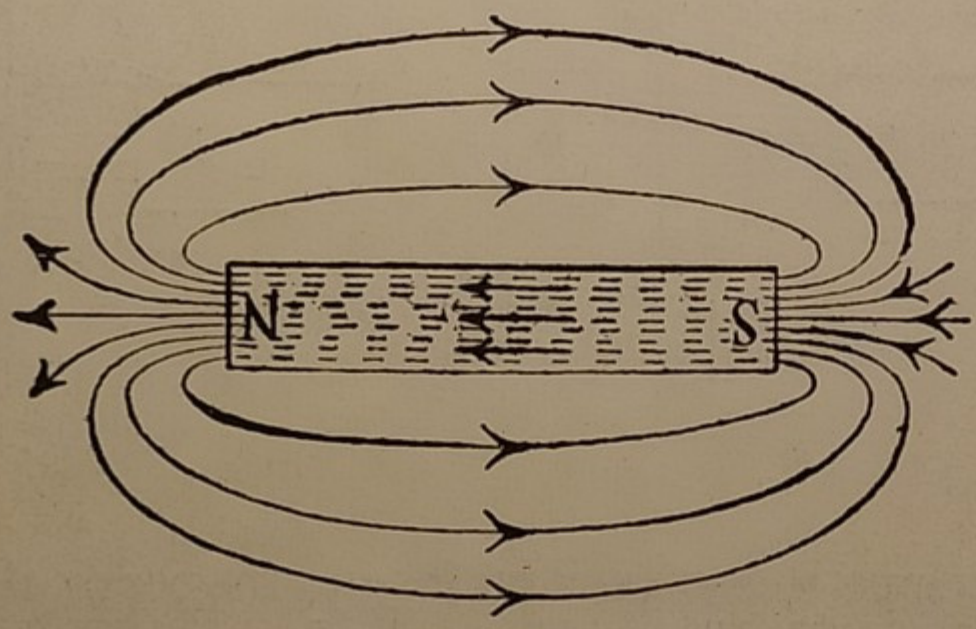


Fig. 253.

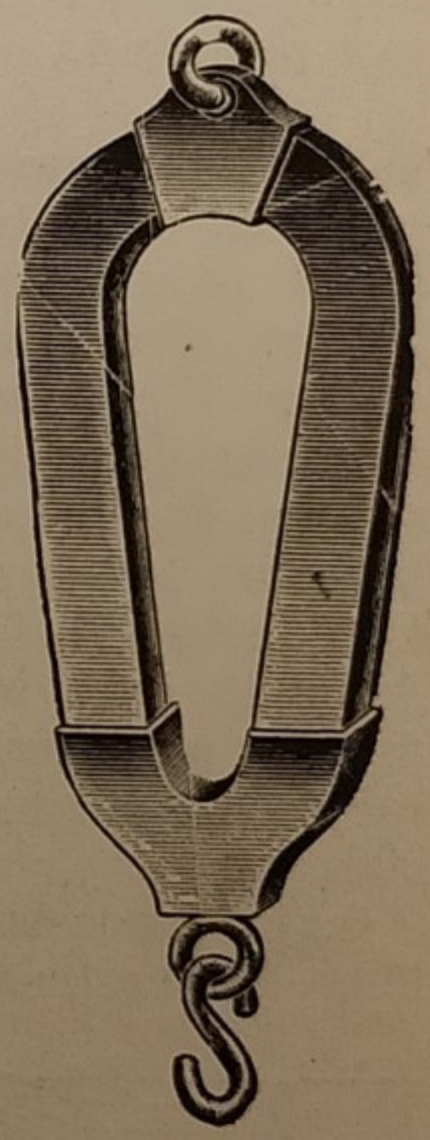


Fig. 254.

Se si considera il campo esterno di una calamita rettilinea, si vede che le linee di forza nel mezzo sono dirette in senso opposto che dentro la calamita (Fig. 253); questa è quindi soggetta ad una induzione propria, che tende a smagnetizzarla, specialmente se si assoggetta ad urti o vibrazioni.

Per conservare quindi la calamita non si deve scaldarla nè sottoporla a urti. Bisogna inoltre annullare il suo campo esterno, riunendone i poli con una sbarretta di ferro, che si chiama **ancora o armatura** (Fig. 254); si forma così un **circuito magnetico chiuso,** e le linee di forza si mantengono dentro l'armatura senza uscire più all'esterno.

149. **Portata** di una calamita è il peso massimo che essa può sostenere, attaccato all'armatura. Non si confonda la portata con la forza attrattiva; questa dipende, come sappiamo per la legge di Coulomb (§ 139), anche dalla distanza.

La portata, in fondo, sarebbe la forza attrattiva alla minore distanza. Non si creda che questa distanza si annulli allorchè l'armatura è in contatto coi poli; alla superficie tanto dei poli che dell'armatura, vi è sempre uno strato d'ossido, od altre impurità, che impediscono il contatto immediato tra ferro e ferro; nè del resto questo potrebbe essere in tutti i punti, non essendo le superfici di contatto piani coincidenti in ogni punto. Esiste quindi sempre uno spazio tra poli ed armatura, chiamato l'**intraferro**, che offre una certa **resistenza magnetica** al passaggio delle linee di forza. L'attrazione magnetica acquisterà così un valore massimo, non infinito (quale sarebbe per $r = 0$ nella 1) del § 139), che è la portata della calamita.

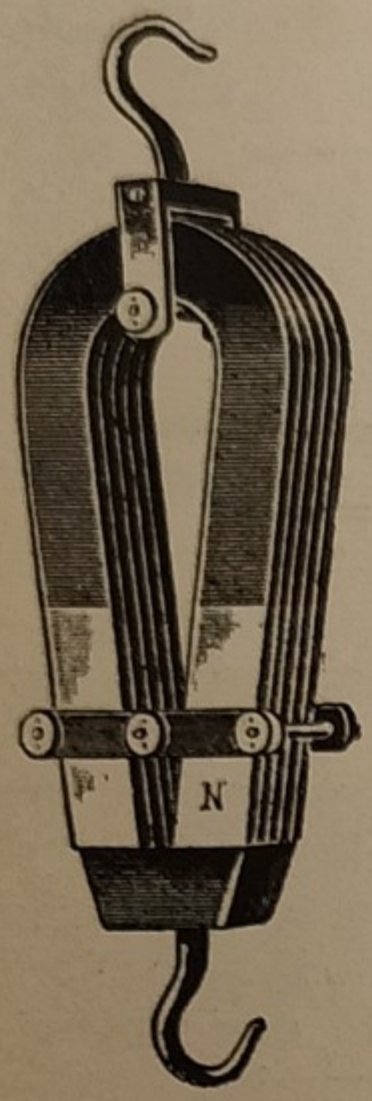


Fig. 255.

Essa dipende dalla sezione della calamita, dalla qualità dell'acciaio, e dal modo con cui è stata magnetizzata. Praticamente di rado sorpassa il valore di un peso doppio della calamita, e s'indebolisce col tempo.

Il miglior acciaio per calamite è quello contenente un po' di tungsteno.

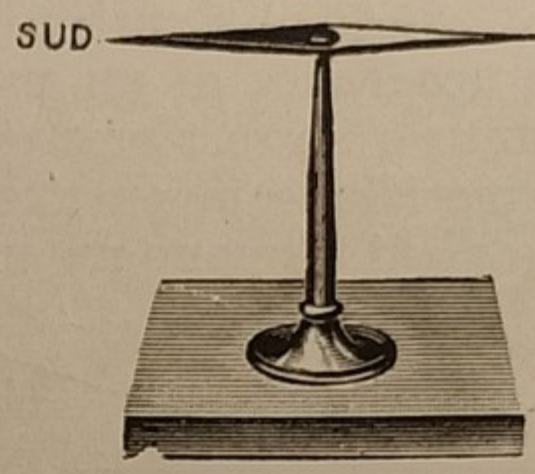


Fig. 256.

150. **Fasci magnetici.**— Coi processi antichi di magnetizzazione, l'azione magnetica si limitava allo strato superficiale del magnete. Non vi era pertanto convenienza a costruire calamite grosse, massicce, di un pezzo solo. Conveniva invece costruirle in più lamine sovrapposte, che si magnetizzavano separatamente e poi si riunivano insieme in modo da formare una calamita sola.

Queste calamite si chiamano **fasci magnetici** (Fig. 255) e si adoperano allo scopo di ottenere a pari dimensioni della calamita, campi magnetici più intensi. Ma oggi sono in disuso; potendosi magnetizzare completamente, anche all'interno, calamite massicce, con la corrente elettrica.

Magnetismo terrestre.

151. **Campo magnetico terrestre.** — Abbiamo visto (§ 142) che un ago calamitato posto in un campo magnetico, ruota finchè il suo asse magnetico si dispone nella direzione delle linee di forza. Così ponendo una calamita su un ago calamitato, questo si dispone parallelamente ad essa, coi poli come è indicato nella Fig. 256. Questa esperienza ci fa pensare che se un ago calamitato si orienta da Nord a Sud, deve esservi un magnete che lo diriga così; tale magnete non può essere che la Terra, la quale quindi produce un campo magnetico. La Terra in conclusione equivale ad una grande calamita, all'incirca nella direzione del suo asse.

L'azione della Terra sull'ago è solo direttiva (§142); le due forze che essa esercita sui due poli dell'ago sono equivalenti e formano una coppia (Vol. 1°-§61); cioè l'ago per l'azione della Terra può solo girare su sè stesso, ma non spostarsi. Infatti ponendo una sbarretta magnetizzata a galleggiare su un pezzo di sughero sull'acqua (Fig. 257), la vedremo orientarsi da nord a sud, ma non spostarsi verso l'orlo del recipiente.

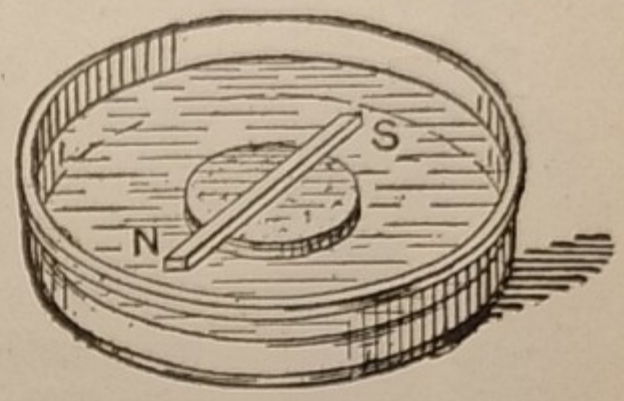


Fig. 257.

152. **Declinazione magnetica.** — L'ago non si dirige esattamente da nord a sud.

Si chiama: **meridiano magnetico,** il piano (verticale) passante per l'asse magnetico di un ago (orientato e fermo) e pel centro della Terra; **meridiano geografico** di un punto sulla Terra, è il piano che passa per questo punto e l'asse terrestre.

Ora, il meridiano magnetico non coincide col meridiano geografico; ma questi due piani formano un angolo δ, che si chiama **angolo di declinazione,** (Fig. 258). Esso può essere *orientale* od *occidentale*, a secondo che il polo Nord dell'ago è ad oriente o ad occidente rispetto al meridiano astronomico.

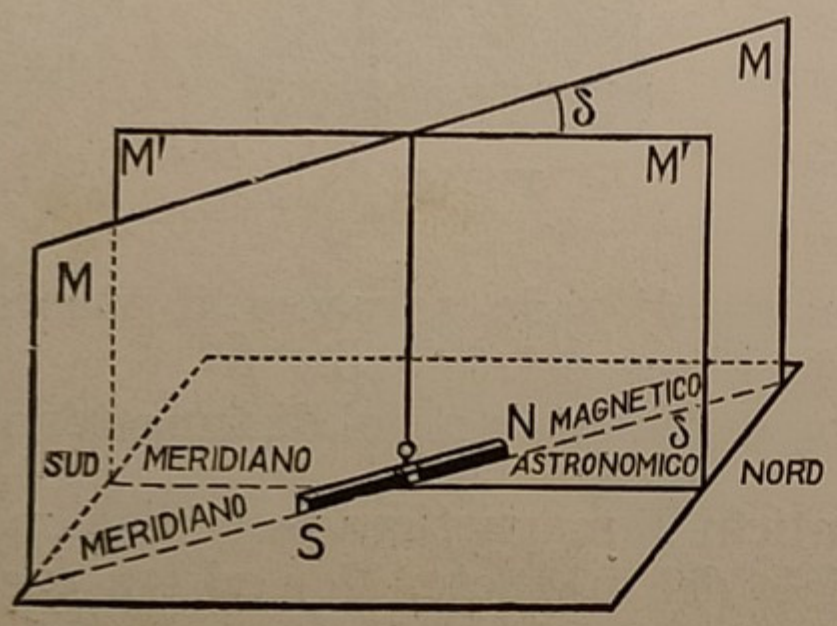


Fig. 258.

L'angolo di declinazione varia da luogo a luogo; a Torino è ora di circa 9°, occidentale. Ma in uno stesso luogo varia col tempo.

Vi sono variazioni lentissime, **secolari**; ad es., a Parigi nel 1580, epoca alla quale cominciarono a farsi queste osservazioni, la declinazione era orientale, di 11° 31′; poi è andata diminuendo finchè nel 1666 divenne nulla, nel quale anno pertanto l'ago si rivolgeva esattamente al nord; dopo la declinazione divenne occidentale e raggiunse il suo massimo valore di 22° 34′ nel 1814; da quell'anno essa decresce continuamente di circa 8′ all'anno, onde tornerà ad annullarsi verso la fine del secolo; e così via.

Vi sono: variazioni **annuali**; la declinazione, come s'è detto, diminuisce di circa 8′ all'anno; variazioni **diurne** e **accidentali,** quest'ultime dovute alla comparsa di macchie solari, o ad aurore polari.

153. **Inclinazione magnetica.** — Si abbia un ago bene equilibrato, cioè con l'asse di rotazione passante per il suo centro di gravità; se non è magnetizzato, esso può mantenersi in qualunque direzione, poichè è in equilibrio indifferente (Vol. 1° - § 72); lo stesso ago, magnetizzato e posto nel meridiano magnetico, si inclina sull'orizzonte, ed assume una direzione che poi mantiene e riacquista se viene spostato, (Fig. 259). Più esattamente: l'asse magnetico dell'ago forma con l'orizzonte un angolo i, che si chiama **angolo di inclinazione.**

Anche quest'angolo varia da luogo a luogo, aumentando da 0° a 90° man mano che si procede dall'equatore al polo. Infatti rappresentiamo in

Fig. 260 una sezione diametrale della sfera terrestre; siano N ed S i poli magnetici della Terra ed EE' l'equatore; rappresentiamo anche, con le

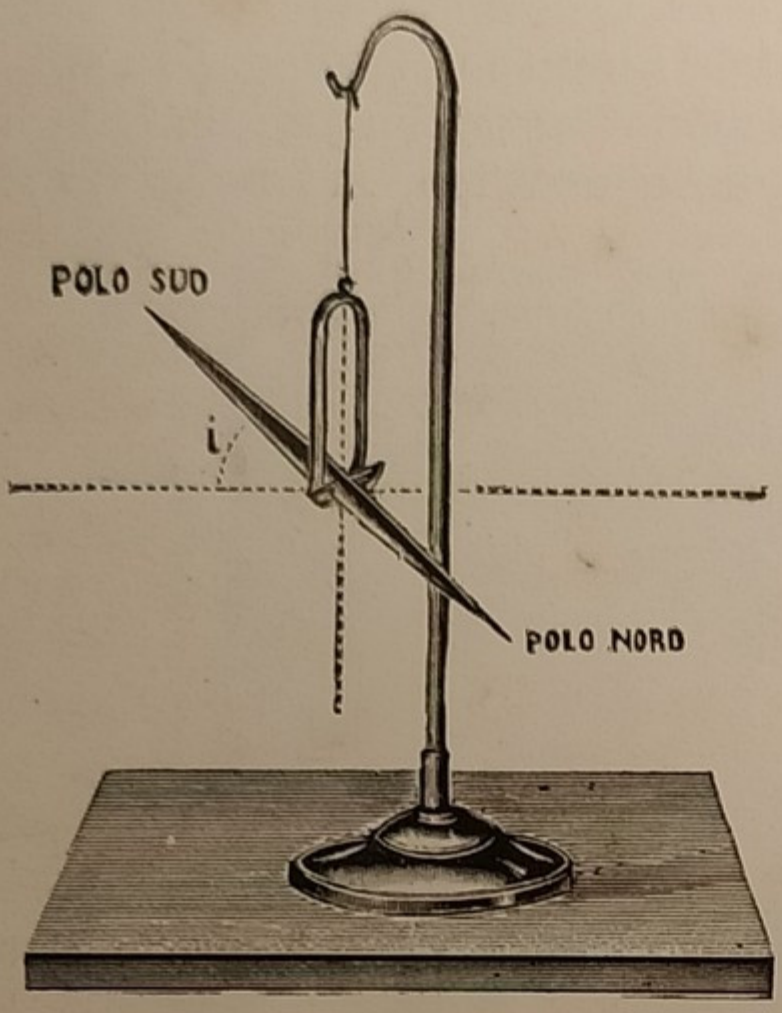


Fig. 259.

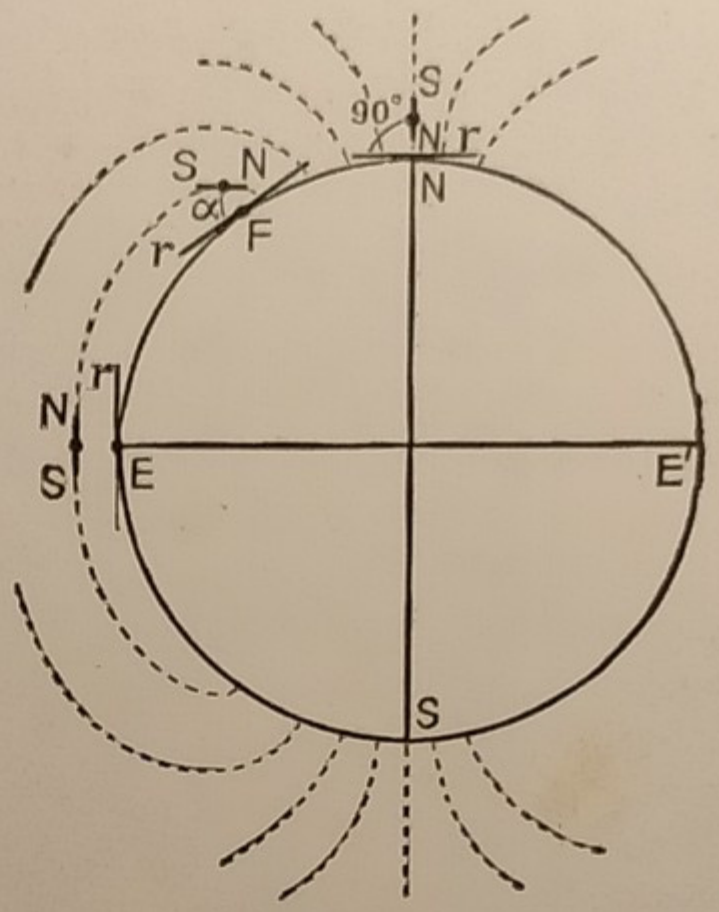


Fig. 260.

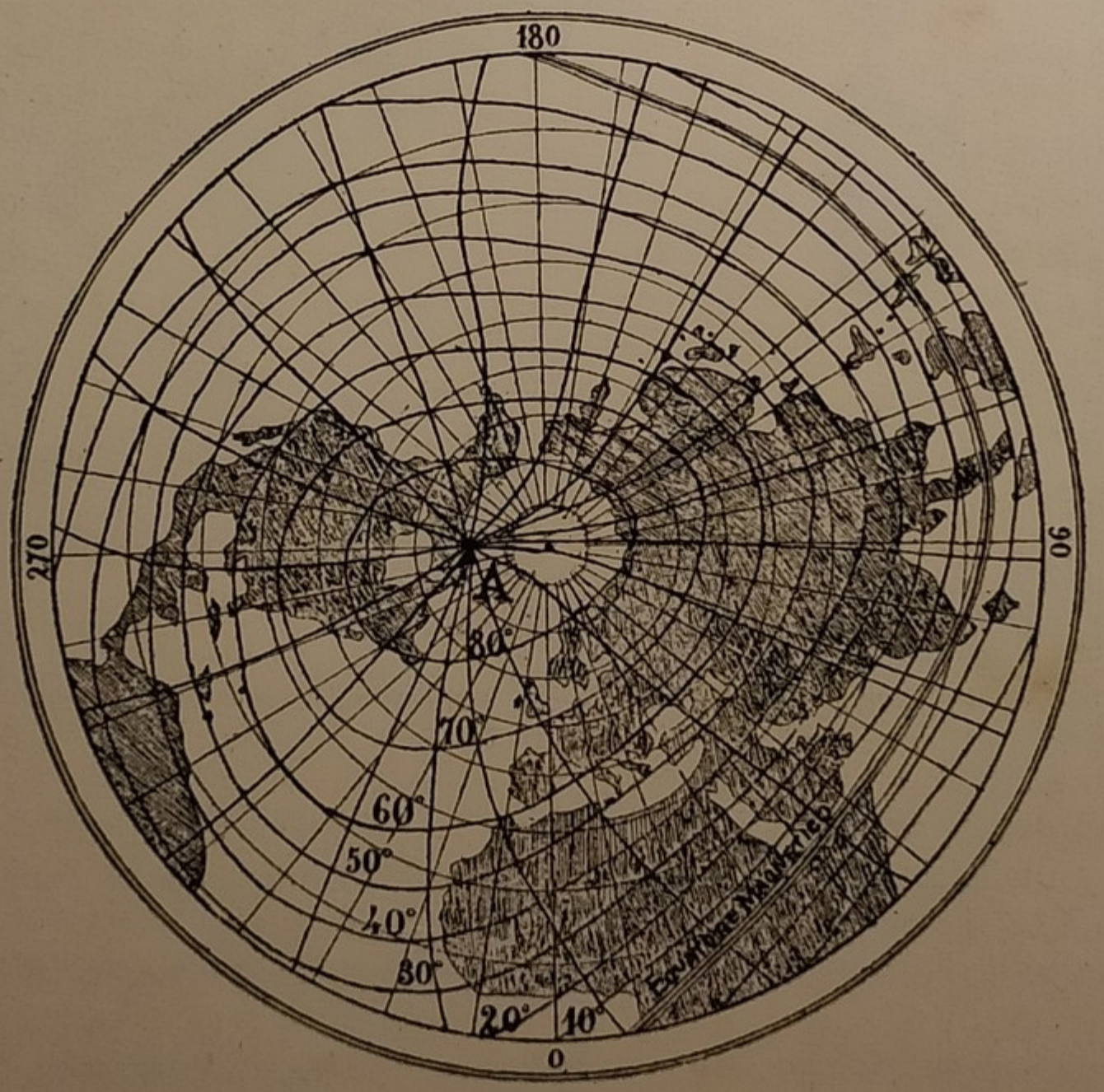


Fig. 261.

punteggiate, le linee di forza del campo magnetico terrestre. Ricordiamo (§ 142) che l'ago magnetico si orienta nella direzione delle linee di forza; allora all'equatore, cioè in E, l'ago NS si dispone parallelamente al piano

tangente r, cioè all'orizzonte, e quindi l'inclinazione è zero. In un altro punto F l'ago NS forma con l'orizzonte r l'angolo di inclinazione α; e vicino al polo N un angolo di 90°.

A Torino l'inclinazione è ora di circa 61°. Il punto della Terra in cui l'inclinazione è di 90°, cioè dove l'ago si dispone verticalmente, si chiama il **polo magnetico.** Esso non coincide col polo geografico, ma ne è alquanto

Fig. 262.

discosto. Ad es., il polo magnetico Nord è nell'isola di Melville, a nord dell'America, alla latitudine di 70° (A in Fig. 261), ed è stato scoperto da Sir Cross fin dal 1831; e quello Sud nella terra Vittoria.

Anche l'angolo d'inclinazione in uno stesso luogo varia col tempo.

154. **Carte magnetiche.** — Unendo con una linea continua tutti i punti di una regione aventi lo stesso angolo di declinazione, si ottiene una linea chiamata **isogona**; parimenti unendo tutti i punti aventi lo stesso angolo d'inclinazione, si ottiene una linea chiamata **isoclina.** Tracciando su una carta geografica le isogone e le isocline, si ottiene una **carta magnetica.** Le isocline, per la spiegazione fatta nel paragrafo precedente, hanno all'in-

circa l'andamento dei paralleli geografici; l'isoclina 0° si chiama equatore **magnetico.** Le isogone hanno all'incirca l'andamento dei meridiani, e si riuniscono nei poli magnetici (Fig. 261).

La Fig. 262 mostra la carta magnetica dell'Italia nel 1910. Le isogone sono rappresentate dalle linee intere e le isocline dalle punteggiate. Le irregolarità ed anse che si riscontrano nelle isogone, sono dovute all'esistenza di minerali magnetici, che si trovano localmente nel sottosuolo. Le linee indicate con retta e punto, rappresentano i punti in cui il campo magnetico terrestre ha la stessa intensità, e si chiamano **isodinamiche.**

155. **Bussola.** — Si è tratto profitto della orientazione dell'ago magnetico verso il nord, per costruire uno strumento che indichi ai viaggiatori ed ai naviganti la direzione in cui procedono.

Questo strumento è la **bussola,** che si crede fosse nota ai Cinesi da moltissimo tempo; ma si attribuisce a Flavio Gioia di Amalfi il merito di averla per il primo adoperata nella navigazione, al principio del secolo XIV.

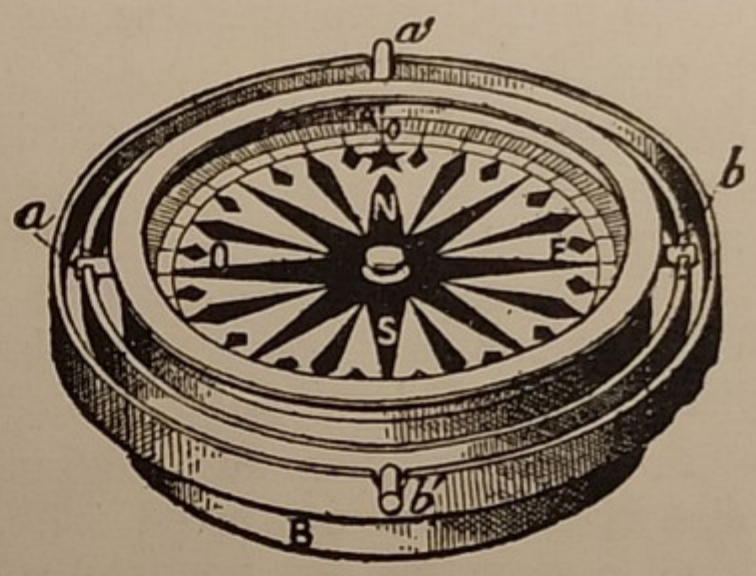


Fig. 263.

La bussola marina si compone di un sottile disco di carta o di mica o di alluminio, su cui è disegnata la rosa dei venti, (Fig. 263). Sotto al disco sono attaccate, nella direzione nord-sud, delle sbarrette calamitate; il tutto è sospeso su una punta ed è racchiuso in una scatoletta di rame, in modo che la rosa dei venti possa girare liberamente. Il *N* di questa rosa dei venti si dirige così costantemente al nord, comunque si muova la scatola, cioè il bastimento che porta la bussola. Un segno *A* fatto sulla scatola, indica la direzione dell'asse del bastimento, e mostra quale angolo tale direzione fa con la linea del nord; cioè in quale direzione procede il bastimento. Poichè l'ago non si dirige esattamente al nord, bisogna conoscere l'angolo di declinazione del luogo in cui si trova il bastimento; che si desume dalle carte magnetiche, che il Capitano ogni volta consulta.

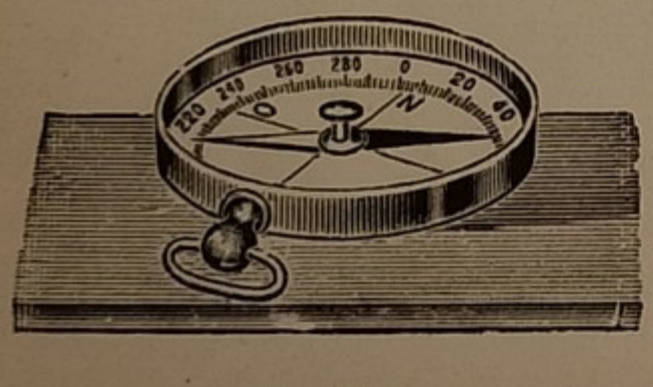


Fig. 264.

La scatola della bussola è sostenuta da due anelli, imperniati uno con l'altro con due assi $ab - a'b'$ fra loro perpendicolari; questa si chiama la **sospensione cardanica** (Vol. 1° - Fig. 244) e serve perchè il piano della rosa dei venti si mantenga sempre orizzontale qualunque sia l'inclinazione e il movimento assunto dal bastimento.

Vi sono bussole piccole, più semplici, adoperate anche come ciondoli alla catena dell'orologio, (Fig. 264).

La bussola magnetica non serve nelle vicinanze dei poli. Ivi infatti l'ago magnetico tende a disporsi verticalmente, come abbiamo visto nella Fig. 260; e quindi non risente un'azione direttiva sufficiente nella direzione del meridiano. Perciò i bastimenti e le aeronavi che si dirigono verso il polo, devono munirsi di altri strumenti (*bussole giroscopiche*), fondati su principi diversi (Vol. 1° - § 117).

Problemi da risolvere.

1. Quale dev'essere la intensità di un polo magnetico, perchè respinga un polo eguale, posto alla distanza di mm. 25, con la forza di g. 35?

2. Una calamita cilindrica, il cui polo è di 175 unità, ha la lunghezza di cm. 7 ed il diametro di mm. 12; essa è disposta coll'asse verticale e col polo N in alto. Sulla stessa verticale ha l'asse un'altra calamita fissa, lunghissima, col polo S in basso; la distanza tra S ed N è di mm. 8. Calcolare quale dev'essere la intensità minima del polo S, perchè sollevi a sè la prima calamita.

3. Quale forza e in quale direzione, sviluppa una calamita rettilinea di cm. 20 di lunghezza, i cui poli hanno l'intensità di 150 (u. m.), su un polo nord dell'intensità di 60 unità, posto sull'asse del segmento che congiunge i due poli della calamita, a cm. 12 da esso?

4. Una calamita rettilinea di lunghezza l, può ruotare attorno ad un perno orizzontale di raggio r; l'intensità di un suo polo è m; è collocata in un campo magnetico uniforme, la cui direzione è verticale e di intensità H; l'asse magnetico della calamita (perpendicolare all'asse di rotazione del perno) fa l'angolo α con la direzione del campo. Calcolare qual peso occorre sospendere ad un filo sottilissimo avvolto sul perno della calamita, perchè essa sia in equilibrio.

5. Due aghi magnetici di lunghezza rispettivamente l ed l_1, e con poli d'intensità rispettivamente m ed m_1, sono collegati rigidamente con il centro in comune e gli assi magnetici perpendicolari. Sono collocati in un campo magnetico uniforme, orizzontale, di intensità H, e possono ruotare insieme attorno al loro centro comune, in un piano orizzontale. Calcolare l'angolo che l'asse magnetico di uno degli aghi fa con la direzione del campo.

6. Un cubo di ferro la cui permeabilità è di 1500 ed il cui lato è di mm. 25, è posto in un campo uniforme la cui intensità è di 2,5 unità, con una faccia perpendicolare al campo. Calcolare il flusso che attraversa il cubo.

ELETTROSTATICA

Azioni elettriche.

156. **Elettrizzazione per strofinìo.** — Talete da Mileto, circa 2500 anni fa, osservò che un pezzo di ambra strofinata con un panno di lana, acquista la proprietà di attrarre corpi leggeri, come pagliuzze, piume, ecc. Più tardi il Gilbert,(1) medico inglese, verso il 1600, riscontrò la medesima proprietà nel vetro, nella ceralacca, ecc. Da questi semplicissimi fatti ebbe origine tutto il vasto complesso di cognizioni che costituisce

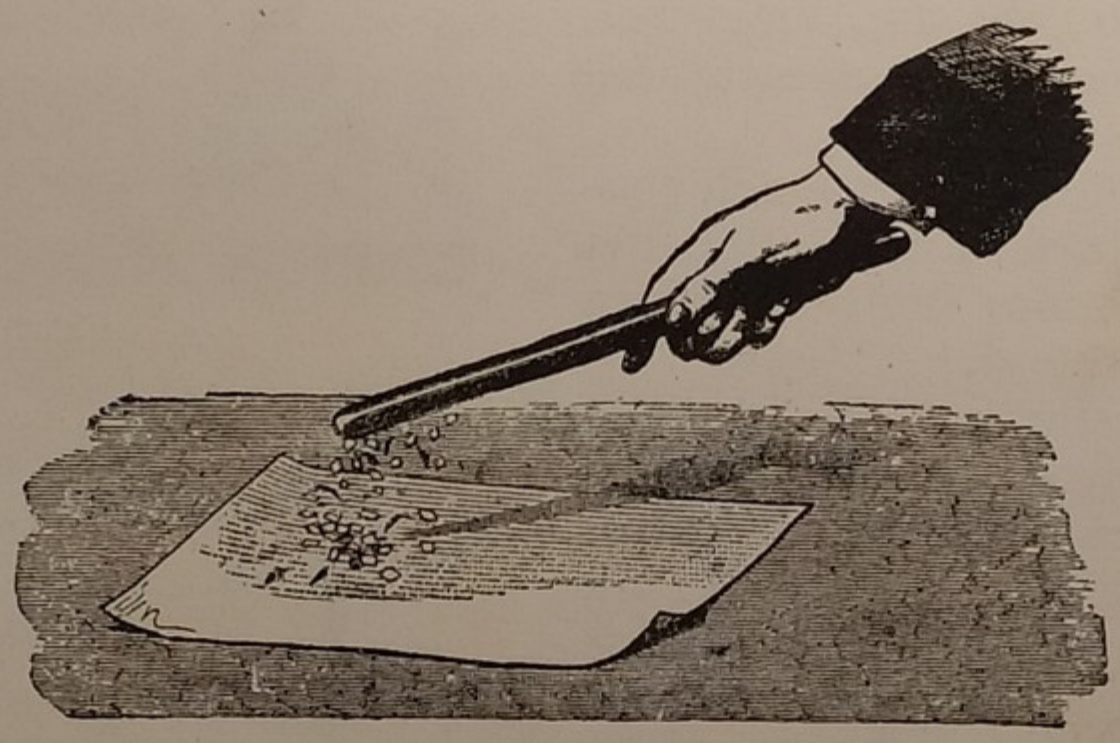


Fig. 265.

la parte più importante delle scienze fisiche, dalla quale si sono tratte tutte quelle meravigliose applicazioni, che hanno completamente trasformato la vita dell'uomo sulla Terra. Possiamo verificare anche noi questo primo fenomeno, strofinando una bacchetta di vetro o di ebanite(2) con una stoffa di lana, e avvicinandola a dei pezzettini di carta; questi si dirizzano e vengono subito attratti dalla bacchetta, (Fig. 265).

Si dice che questi corpi sono *elettrizzati*, e si chiama **elettricità**(3) la causa incognita che produce questi fenomeni. Si osservi che l'elettricità non è materia; infatti una bacchetta di vetro non elettrizzata e la stessa bacchetta elettrizzata, hanno esattamente lo stesso peso. Vedremo bensì, che l'elettricità è una *energia*. Per necessità di linguaggio penseremo tuttavia per ora, che l'elettricità sia *qualche cosa* che risieda in un corpo elettrizzato (§ 168).

---

(1) Gilbert William; n. a Colchester nel 1540, m. a Londra nel 1603.
(2) L'ebanite è la stessa sostanza della gomma elastica, resa più dura con *la vulcanizzazione*; cioè con l'aggiunta di zolfo e cottura a temperatura elevata.
(3) Il nome deriva da *electron*, che in greco vuol dire appunto l'ambra.

157. **Pendolino elettrico.** — Per vedere se un corpo è elettrizzato, serve meglio il pendolino elettrico, (Fig. 266). Esso è formato di una pallottolina *A* di sughero o di midollo di sambuco, sospesa con un filo di seta ad un sostegno *V*, solitamente di vetro. Se avviciniamo alla pallottolina un corpo elettrizzato *S*, essa si accosta a questo.

158. **I due stati elettrici.** — Avviciniamo alla pallina del pendolino una bacchetta di vetro elettrizzata; la pallina è attratta, ma appena ha toccato la bacchetta è subito respinta e non è più attratta dal vetro.

Se in queste condizioni le avviciniamo una bacchetta di ebanite elettrizzata, la pallina è ancora attratta; per essere nuovamente respinta, appena ha toccato l'ebanite. Viceversa, respinta dall'ebanite, è attratta dal vetro; e così di seguito.

Abbiamo perciò nel vetro e nell'ebanite due *stati elettrici* diversi; che una volta si chiamavano: **elettricità vitrea** ed **elettricità resinosa.**

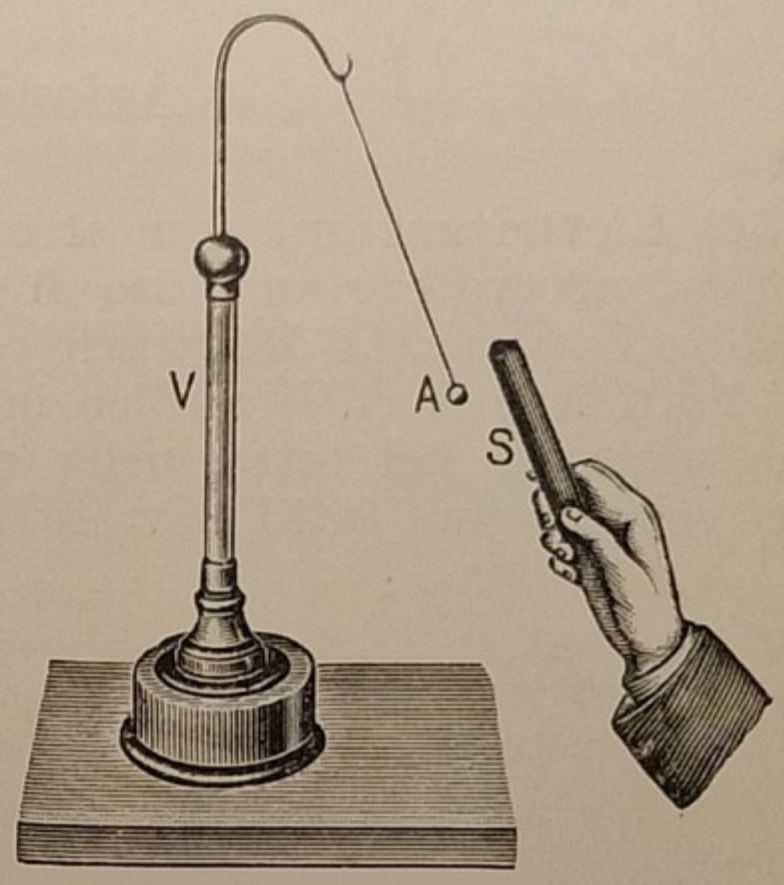


Fig. 266.

Ma è stato osservato che lo stesso corpo, ad es. il vetro, si elettrizza come l'ebanite, se anzichè sulla lana è strofinato su una pelliccia di gatto (vivo), e si elettrizza pure come l'ebanite se anzichè liscio il vetro è smerigliato e si strofina sulla seta. Cioè lo stesso corpo può elettrizzarsi in un modo o nell'altro, secondo il corpo con cui si strofina, e secondo lo stato della sua superficie. Ad evitare confusione chiameremo meglio:

elettricità positiva (s'indica col segno +), lo stato elettrico del vetro liscio strofinato con la lana;

elettricità negativa (e s'indica col segno —), lo stato elettrico dell'ebanite, pure strofinata con la lana.

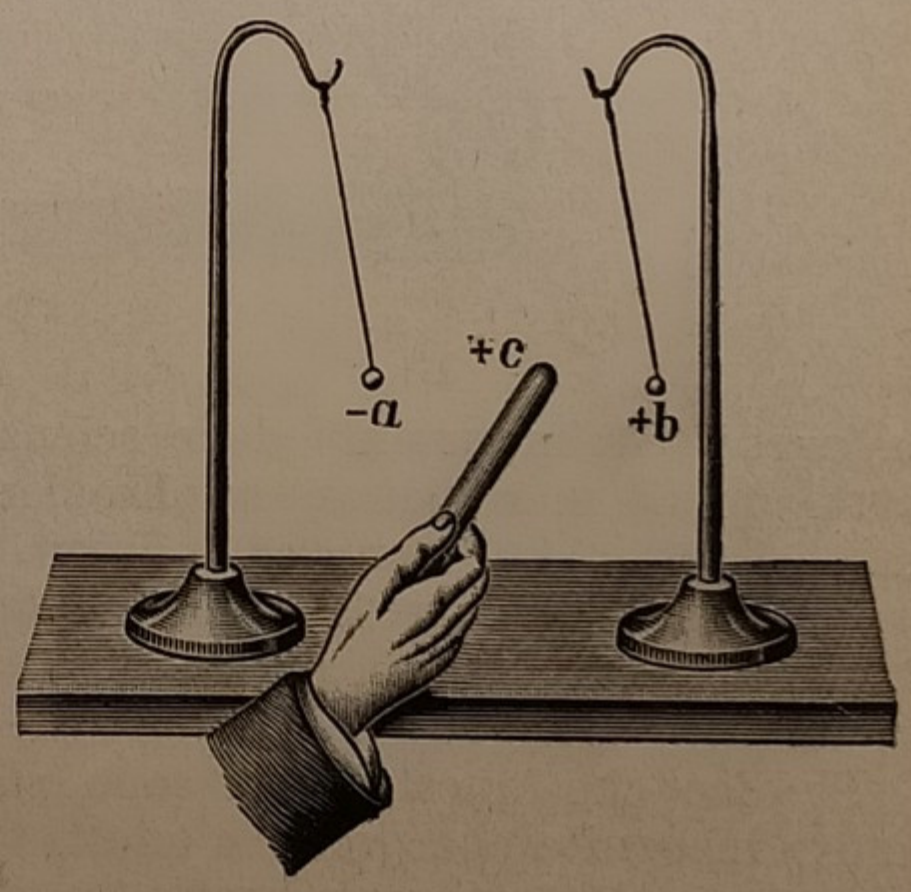


Fig. 267.

159. **Attrazioni e ripulsioni elettriche.** — Abbiamo visto che la pallina del pendolino appena ha toccato il vetro è da questa respinta; e poichè col contatto la pallina ha acquistato un po' di elettricità di quella della bacchetta, concluderemo che la bacchetta e la pallina elettrizzate entrambe positivamente, si respingono. Parimenti si respingono una bacchetta di ebanite e la pallina, entrambe elettrizzate negativamente. Dunque:

Corpi elettrizzati dello stesso segno si respingono.

La pallina respinta dal vetro, cioè elettrizzata positivamente, è invece attratta dall'ebanite, elettrizzata negativamente; dunque:

Corpi elettrizzati di segno contrario si attraggono; (Fig. 267).

Queste azioni tra i corpi elettrizzati ci fanno pensare che anche l'elettricità sia una forma di energia (Vol. 1° - § 118); perciò parliamo di **energia elettrica.**

160. **L'atomo e l'elettrone.** — La *Chimica* aveva fondato l'ipotesi dell'*atomo* indivisibile, come ultima particella costitutiva della materia. Con l'aggruppamento degli atomi, eguali o diversi, in molecole, si spiega la costituzione di tutti gli innumerevoli corpi, semplici e composti, che costituiscono la Natura.

Alla fine del secolo scorso la scoperta del *radio* (§ 214), con cui si provò la trasformazione di un corpo semplice in un altro, ci indusse a ritenere che l'atomo non fosse indivisibile. Pensiamo ch'esso sia formato da altre particelle ancora più piccole, la cui massa si calcolò essere 1840 più piccola e il raggio 50000 minore, dell'atomo dell'idrogeno (il più piccolo tra tutti gli atomi); tali particelle furono chiamate **elettroni**; essi sono così piccoli, da non costituire materia, nel senso che diamo comunemente a questa parola; inoltre sono carichi di elettricità negativa, e si muovono con velocità enorme, che può raggiungere i $^9/_{10}$ di quella della luce. (§§ 206 - 215).

Come vedremo meglio in seguito (§ 227), dobbiamo supporre che l'atomo di un corpo sia costituito da *un nucleo* centrale, la cui massa formi tutta la massa dell'atomo, ma di dimensioni piccolissime (il diametro del nucleo è $^1/_{5000}$ ed anche meno di quello di tutto l'atomo). Il nucleo è elettrizzato positivamente; attorno ad esso si muovono uno o più elettroni. Ogni atomo quindi va concepito come un sistema solare in miniatura, in cui il Sole è rappresentato dal nucleo elettrizzato positivamente, di dimensioni piccolissime ma di massa enorme (rispetto agli elettroni), e i pianeti sono gli elettroni che gli turbinano attorno. La forza attrattiva fra l'elettricità positiva del nucleo e quella negativa degli elettroni, corrisponde alla forza di gravitazione per la quale il Sole attira i pianeti.

161. **Come si spiega l'elettrizzazione.** — In un corpo non elettrizzato, cioè, come si dice, *allo stato neutro*, dobbiamo pensare che l'elettricità positiva del nucleo di ogni atomo equivalga a quella negativa degli elettroni che lo circondano; le loro azioni esterne quindi si elidono, e l'atomo è neutro. Se dagli atomi possono allontanarsi alcuni elettroni, si manifesta l'azione dell'elettricità positiva eccedente del nucleo, ed *il corpo si carica di elettricità positiva*. Se invece alcuni elettroni vanno ad attaccarsi agli atomi neutri, portano a questi un'eccedenza di elettricità negativa, ed *il corpo si carica di elettricità negativa*.

Elettrizzare un corpo positivamente, vuol dire quindi sottrargli elettroni; elettrizzarlo negativamente, vuol dire invece apportarvi elettroni.

Strofinando un corpo con un altro, pensiamo che con ciò si stacchino alcuni elettroni da uno dei corpi e si portino su l'altro; il primo si elettrizzerà positivamente, il secondo negativamente.

162. **Corpi conduttori ed isolanti.** — Una bacchetta di vetro strofinata ad un estremo, attira il pendolino solo in quel punto; l'elettricità rimane cioè localizzata nel punto in cui si è prodotta, e non si trasmette lungo la bacchetta.

Corpi che si comportano in tal modo si chiamano: **isolanti, o coibenti o dielettrici.** Tali sono: il vetro, la porcellana, l'ebanite, lo zolfo, le resine, la paraffina, la seta, la lana, il petrolio, i gas asciutti, ecc.

Se si strofina una bacchetta di metallo tenuta con la mano, non appare segno di elettrizzazione. Se la stessa bacchetta la teniamo invece per mezzo di un'altra bacchetta di vetro a cui essa è attaccata (Fig. 268), allora si elettrizza; ma strofinata ad un estremo, si trova elettrizzata in tutti i suoi punti. Cioè l'elettricità sviluppata in un punto, si è propagata istantaneamente per tutta la bacchetta. Corpi così fatti si chiamano **conduttori.** Tali sono: tutti i metalli, il carbone, le soluzioni acquose di acidi e sali, il mercurio, il corpo umano, le piante, ecc.

Fig. 268.

La Terra è un conduttore; quindi qualunque corpo elettrizzato, messo in comunicazione con la terra, cede ad essa l'elettricità, cioè *si scarica.* Ciò spiega perchè non si elettrizza la bacchetta di metallo tenuta direttamente con la mano; strofinandola si produce elettricità, ma essa man mano che si sviluppa si propaga per il nostro corpo alla terra e vi si disperde.

I corpi poco umidi, come la carta, le stoffe di cotone, il legno asciutto, l'aria umida, ecc., sono **semiconduttori**; cioè permettono il passaggio dell'elettricità, ma lentamente; quindi essi *disperdono* l'elettricità.

Possiamo renderci conto come i solidi possano essere conduttori od isolanti. Un corpo è costituito da innumerevoli atomi, cioè da innumerevoli sistemi nucleo-elettroni. In un corpo isolante nucleo ed elettrone rimangono sensibilmente nelle loro posizioni, senza potersi allontanare da esse, e quindi non possono trasportare lontano le loro cariche; cioè non vi è passaggio di elettricità. Nei conduttori invece i nuclei non si spostano; ma alcuni degli elettroni si muovono velocissimamente da un capo all'altro del corpo, trasportando in ogni punto la loro carica elettrica; da ciò deriva la conducibilità.

Vedremo in seguito qual'è il meccanismo della conducibilità nei fluidi.

Non vi sono corpi perfettamente isolanti, come non vi sono corpi perfettamente conduttori (§ 268).

163. **Isolatore di Mascart.** — Il vetro è un ottimo isolante, purchè asciutto; ma esso è *igroscopico*, cioè si ricopre alla superficie di umidità, che prende dall'aria. Quindi il vetro comunemente disperde l'elettricità.

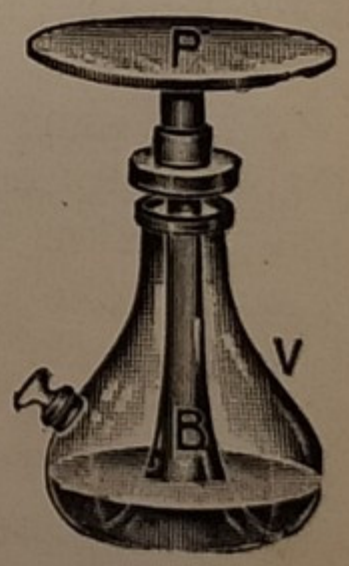


Fig. 269.

Si può rimediare a tale inconveniente, facendo uso dell'**isolatore di Mascart.** Esso è formato da una bottiglia di vetro V (Fig. 269) al cui fondo è fissata una bacchetta di vetro B, che esce dal collo della bottiglia, senza toccarlo; all'estremità superiore della bacchetta è posto un piattello P, che serve da sostegno ai corpi elettrizzati da isolare. Nella bottiglia si introduce un po' di acido solforico concen-

trato, il quale assorbe l'umidità e tiene bene asciutta la bacchetta *B*, che così rimane bene isolante.

La conducibilità dei corpi dipende anche dalla loro temperatura; così il vetro è un ottimo isolante a temperatura ordinaria; ma riscaldato diventa abbastanza conduttore. Dipende anche dallo stato d'aggregazione; se l'acqua comune conduce l'elettricità, il ghiaccio è invece un buon isolante.

164. **Tutti i corpi si elettrizzano per strofinìo.** — Anticamente si riteneva che vi fossero corpi elettrizzabili e corpi non elettrizzabili con lo strofinìo. Oggi è stato provato che *due corpi qualsiansi strofinati tra loro si elettrizzano entrambi, ed assumono quantità di elettricità* (§ 168) *eguali ma di segno contrario.*

Ciò posto, se strofiniamo una bacchetta di vetro con un panno di lana, il vetro si elettrizza positivamente e la lana negativamente; strofinando una bacchetta di ebanite con lo stesso panno di lana, l'ebanite si elettrizza negativamente e la lana positivamente. Dunque lo stesso corpo, cioè la lana, si elettrizza positivamente o negativamente, secondo il corpo con cui si strofina; ciò conferma quanto abbiamo accennato al § 158 sulla diversa elettrizzazione del vetro.

Le resine, in generale, si elettrizzano negativamente.

165. **Elettroscopî.** — Gli **elettroscopî** servono a vedere se un corpo è elettrizzato e di che segno.

La polvere elettroscopica si adopera allorchè si vuol vedere quali parti di un corpo sono elettrizzate positivamente e quali negativamente. Essa è formata da un miscuglio di minio e di zolfo, in polvere finissima. Viene lanciata o con uno staccio di seta, o con un soffietto, sui corpi elettrizzati: zolfo e minio si separano; lo zolfo (*giallo*) va sulle parti elettrizzate positivamente, e il minio (*rosso*) su quelle negativamente, che così si riconoscono dal colore della polvere che vi si deposita.

Fig. 270.

Ciò avviene perchè i granelli di minio e di zolfo, strofinando tra di loro o contro le maglie dello staccio, si elettrizzano: lo zolfo negativamente perchè è una resina, ed il minio positivamente; e allora sono attratti da un corpo elettrizzato nel modo che si è detto.

L'elettroscopio a foglie d'oro, di A. Volta, è quello più comunemente adoperato. È formato da una bottiglia di vetro, chiusa da un tappo, attraverso cui passa una bacchetta di metallo, che termina superiormente con una pallina *P* (Fig. 270) pure di metallo. Inferiormente sono attaccate alla bacchetta due sottilissime striscioline *SS* di foglia d'oro, o anche di alluminio. Sono di quelle foglie che adoperano i legatori per le dorature sui libri, dello spessore di un millesimo di millimetro, e anche meno.

Toccando la pallina *P* con un corpo elettrizzato, le foglioline ricevono elettricità dello stesso segno e si respingono. Una volta allontanate, le foglioline dovrebbero rimanere perennemente discoste. Ma poichè l'aria non è perfettamente isolante, avviene che l'elettricità dalla pallina si disperde a poco a poco, e le foglioline vanno lentamente ma continuamente acco-

standosi. Ciò avviene in molti minuti, se l'aria è asciutta; in pochi secondi con tempo umido; e istantaneamente toccando P col dito.

Per riconoscere di che segno è elettrizzato un corpo, dopo averne caricato l'elettroscopio, si accosta alla pallina di questo una bacchetta di vetro elettrizzata: se le foglioline si scostano maggiormente, allora il corpo era elettrizzato come il vetro, cioè positivamente; se invece le foglioline si richiudono, il corpo era elettrizzato di segno contrario al vetro, cioè negativamente.

166. **Elettrizzazione per influenza.** — Finora abbiamo veduto due modi per elettrizzare un corpo:

1. Per strofinìo.

2. Per contatto con un altro corpo elettrizzato.

Vi è un terzo modo, a distanza, che si chiama **elettrizzazione per influenza o induzione elettrostatica.**

Si abbia un corpo C, elettrizzato, p. es., positivamente, (Fig. 271); vicino ad esso, senza toccarlo, si ponga un corpo *conduttore* isolato AB. Il corpo C richiama, per attrazione, vicino a sè gli elettroni vaganti lungo AB e li accumula in A; il conduttore AB quindi si elettrizza sotto l'influenza di C: nel punto A più vicino a C, con elettricità di segno contrario a quella di C, (nell'esempio detto, *negativamente*); nel punto B più lontano, con elettricità dello stesso segno, (nell'esempio, *positivamente*); in mezzo rimane una *zona neutra*, cioè non elettrizzata.

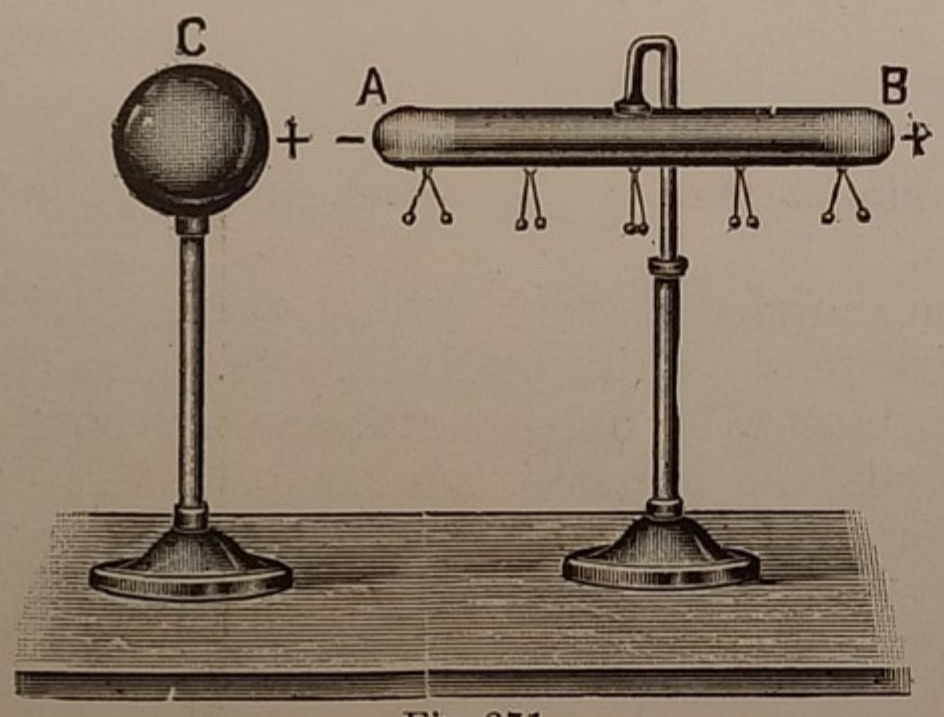


Fig. 271.

Per la dimostrazione sperimentale si possono disporre lungo AB delle coppie di pendolini, che fanno l'ufficio di elettroscopî: vedremo allontanarsi i pendolini alle estremità e non quelli in mezzo, (Fig. 271). Meglio serve la polvere elettroscopica: nel caso della Fig. 271, il corpo C e l'estremità B si ricoprono di zolfo, giallo; mentre l'estremità A si ricopre di minio, rosso.

Se si allontana il corpo inducente C, o ciò che è equivalente, si scarica di elettricità toccandolo col dito, il conduttore AB si diselettrizza; ciò perchè, cessata l'influenza di C, gli elettroni tornano a distribuirsi come prima, su tutto il conduttore AB, rendendolo neutro.

Se però mentre è sotto l'influenza di C, si pone AB in comunicazione con la terra, p. es., toccandolo col dito *in qualunque punto*, allorchè poi si allontana C e si toglie *contemporaneamente* la comunicazione di AB con la terra, si trova questo conduttore elettrizzato *tutto di segno contrario a* C. Questo avviene perchè toccando AB col dito, il conduttore che si elettrizza per l'influenza di C è formato dall'insieme di AB, del nostro corpo e della terra; il punto più vicino a C è ora tutto quanto il conduttore AB, che si elettrizza perciò di segno contrario a C; il punto più lontano è la terra, che si elettrizza dello stesso segno; allontanando C e togliendo il contatto col dito, rimane su AB, come si è detto, l'elettricità di segno opposto a C.

Osserviamo che l'influenza di C su AB avviene solo se fra di essi vi è un mezzo isolante; ma non avviene se è interposto un conduttore, in comunicazione con la terra; come pure non vi è alcuna elettrizzazione, se AB è un corpo isolante. Per il fatto che l'influenza si trasmette attraverso gli isolanti, questi si chiamano *dielettrici* (§ 162), come *diafani* si sono chiamati i corpi che lasciano passare la luce.

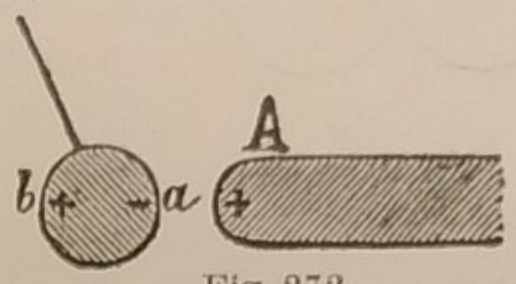


Fig. 272.

167. **Applicazioni dell'influenza elettrostatica.** — Con l'influenza elettrostatica si spiegano parecchi fatti:

1. Abbiamo detto che si attirano due corpi elettrizzati di segno contrario, e non un corpo elettrizzato e uno no. E allora come si spiega, ad es., l'attrazione di un corpo elettrizzato sulla pallina del pendolino?

Ciò avviene perchè la pallina, sotto l'influenza del corpo elettrizzato A (Fig. 272), si elettrizza nel punto a più vicino, di elettricità di segno contrario; onde sono affacciati corpi elettrizzati di segno opposto, che appunto si attirano.

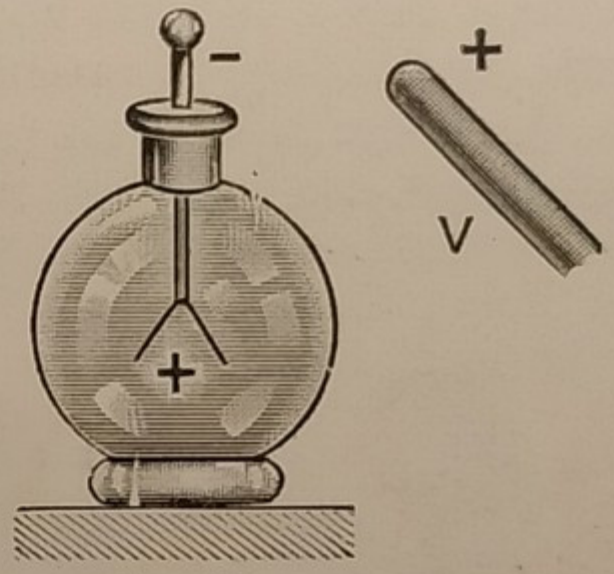


Fig. 273.

2. Per vedere, con l'elettroscopio, se un corpo V è elettrizzato, non è necessario toccarne la pallina; basta avvicinare il corpo elettrizzato, senza toccare l'elettroscopio, (Fig. 273): la bacchetta di metallo di questo si elettrizza per influenza; la parte più vicina, cioè la pallina A, si elettrizza di segno contrario, e la parte più lontana, cioè le foglioline, di elettricità dello stesso segno. Le foglioline quindi divergono per elettricità dello stesso segno di quella del corpo elettrizzato V; se però si allontana V, le foglioline si richiudono subito.

Se V è vicina alla pallina dell'elettroscopio e per un istante tocchiamo col dito questa pallina, tosto le foglioline dell'elettroscopio si accostano; ma poi allontanato il dito e V, subito si riaprono, cariche di elettricità di segno contrario a quella di V. Infatti, tornando ad accostare V, vedremo le foglioline richiudersi.

Quantità d'elettricità.

168. **Carica elettrica.** — Quantunque l'elettricità non sia materia, pure noi la pensiamo come se fosse *qualcosa* che entri nei corpi allorchè si elettrizzano, e ne esca allorchè si scaricano. Diciamo appunto che un corpo elettrizzato *acquista* una certa *carica elettrica*, che *perde*, cioè si scarica, allorchè si diselettrizza.

Questa carica elettrica è una grandezza suscettibile di misura. Infatti, sia A una sfera di metallo, che contenga una certa carica elettrica, p. es. positiva, (Fig. 274). Se tocchiamo A con una sfera B eguale ad essa e non elettrizzata, B si elettrizza anch'essa per contatto; ed è ovvio pensare che dopo il contatto A e B conterranno *cariche eguali*, e la carica totale da esse posseduta è *la somma* delle cariche contenute in ciascuna delle sfere; n sfere

eguali in contatto conterranno una carica n volte quella posseduta da una sfera, e questa $1/n$ di quella totale contenuta in tutte le n sfere. Cioè per l'elettricità sono soddisfatte le condizioni che definiscono una *classe di grandezze.*

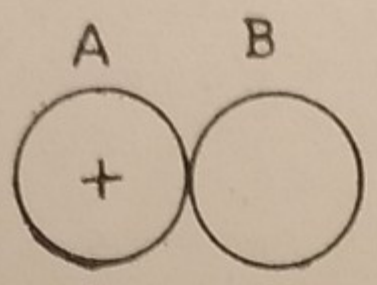


Fig. 274.

Supporremo per ora che si tratti anche di *grandezza continua*; cioè che la quantità di elettricità contenuta in un corpo può aumentare e diminuire di una quantità piccola a piacere; mentre vedremo in seguito (§§ 220 e 223) che ciò a rigore non si può ammettere.

Per misurare allora una carica elettrica, occorre prima stabilire l'**unità di quantità di elettricità.** Questa la dedurremo dalla legge seguente.

169. **Legge di Coulomb.** — Coulomb [1] nel 1775 misurò con l'esperienza, qual'è la forza con cui si attirano o si respingono due corpi elettrizzati, variandone la carica elettrica e la distanza. Egli trovò che:

Due corpi elettrizzati (supposti due punti) *si attirano o si respingono con una forza, che è direttamente proporzionale alle quantità di elettricità che risiedono su di essi, ed inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza.*

Cioè, chiamando F la forza, q e q' le quantità di elettricità sui due corpi, r la loro distanza, si ha:

$$1) \qquad F = \pm k \frac{q\,q'}{r^2}$$

k è un coefficiente di proporzionalità, che dipende dalla natura del mezzo isolante interposto tra i due corpi; se essi sono nel vuoto (o sensibilmente nell'aria), si assume $k = 1$.

Nella 1) si assume il segno $+$ nel caso della repulsione, e il segno $-$ per la attrazione. Infatti, essendo r^2 sempre positivo, perchè un quadrato, il segno di F dipende dal segno di q e q'. Si attribuisce a queste quantità il segno $+$ se sono di elettricità positiva, ed il segno $-$ se di elettricità negativa. Ciò posto, se q e q' hanno lo stesso segno, nel qual caso come sappiamo vi è repulsione, il loro prodotto è positivo, ed F è positiva; se q e q' hanno segno opposto, nel qual caso vi è attrazione, F è negativa.

La legge di Coulomb vale se il mezzo in cui sono i corpi elettrizzati è omogeneo; è una legge rigorosa come quella di Newton vista in meccanica (Vol. 1° - § 124) alla quale è analoga, ed è fondamentale per la teoria matematica dell'Elettricità.

170. **Unità di elettricità.** — Dalla legge di Coulomb relativa ad un fenomeno di elettrostatica, deriviamo l'**unità elettrostatica assoluta** (*u. e. s.*) **di elettricità.** Infatti, sarà $q = 1$ allorchè tutte le altre quantità sono pure uguali ad 1: $q' = r = k = F = 1$; cioè:

L'unità di elettricità è quella che posta, nel vuoto, alla distanza di 1 cm. da una quantità eguale, esercita su di essa l'azione di una dine [2].

Questa è l'unità assoluta, e non ha nome. Essendo troppo piccola, si adopera come unità pratica di elettricità il **coulomb,** che equivale a 3 miliardi di unità assolute: $1\ coulomb = 3 \times 10^9$ (*u. e. s.*).

---

(1) Coulomb Charles, n. ad Angoulème nel 1736, m. a Parigi nel 1806.
(2) Vedasi per la *dine* Vol. 1° - § 85.

Problema. — *Un corpo (puntiforme) del peso di un decigrammo, ha una carica positiva di 0,000 000 2 coulomb ed è posto, nell'aria, su un piano orizzontale isolante; sulla verticale che lo contiene è posto un altro corpo (puntiforme) con una carica negativa di 0,000 000 000 8 coulomb. A quale distanza deve collocarsi il secondo corpo perchè sollevi a sè il primo?*

Soluzione. — Occorre che la forza d'attrazione fra i due corpi eguagli il peso del primo. Quindi nella 1) dobbiamo porre:

$F = g.\ 0{,}1 = 98$ dine (Vol. 1° - § 85);
$q = 2 \times 10^{-7}$ coulomb $= 2 \times 10^{-7} \times 3 \times 10^{9}$ (*u. e. s*) $= 600$ (*u. e. s.*).
$q' = 8 \times 10^{-10} \times 3 \times 10^{9}$ (*u. e. s.*) $= 2{,}4$ (*u. e. s.*); $k = 1$ (nell'aria è quasi come nel vuoto). Risolvendo rispetto a r, tralasciando il segno; si ottiene:

$$98 = \frac{600 \times 2{,}4}{r^2}, \qquad \text{da cui:} \qquad r = \sqrt{\frac{600 \times 2{,}4}{98}} = \textbf{cm. 3,83.}$$

171. **L'elettricità risiede alla superficie esterna dei conduttori.** — Nell'interno di un conduttore, qualunque sia la sua forma, l'azione elettrica risultante dalle cariche elettriche possedute dal conduttore, è nulla. Si dimostra sperimentalmente per mezzo del **pozzo di Beccaria**; si chiama così una sfera cava di metallo S, munita di un foro O (Fig. 275); sostenuta da una bacchetta isolante. Si elettrizza la sfera, toccandola con una bacchetta di vetro strofinato; indi si prende il **piano di prova,** che è un dischetto di metallo d sostenuto da un manico isolante E; si tocca con esso l'interno della sfera attraverso il foro O e si porta il dischetto in contatto con un elettroscopio: questo non accusa alcuna elettrizzazione. Se invece si tocca col piano di prova la superficie esterna della sfera, e poi si tocca con esso l'elettroscopio, le foglioline di questo subito divergono.

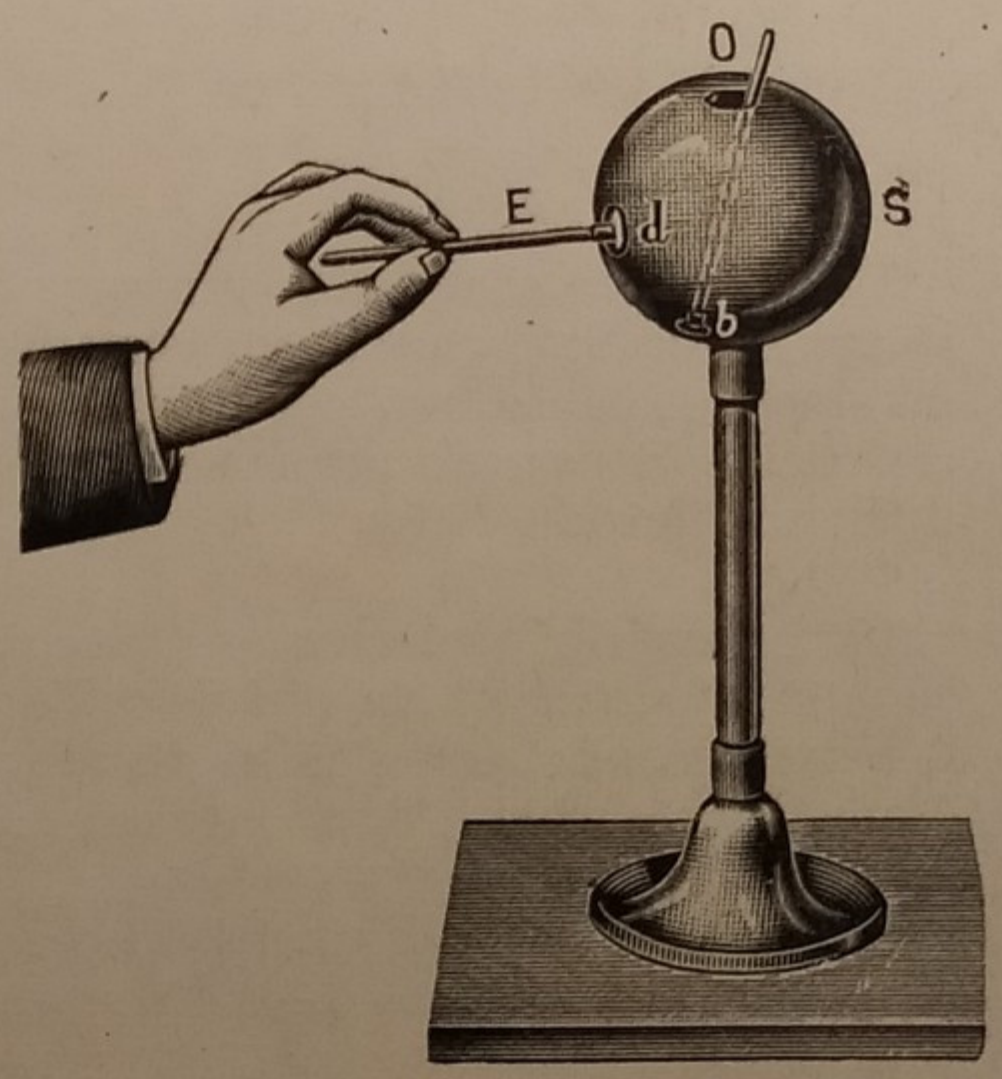


Fig. 275.

Si può fare l'esperienza anche nel seguente modo: si elettrizza una sfera isolata S, (Fig. 276), e poi la si ricopre con due coppe A e B di metallo, tenute con manici isolanti; allontanando nuovamente le due coppe, si trovano elettrizzate, mentre la sfera si è diselettrizzata.

L'azione elettrica è solo alla superficie esterna, anche se il conduttore non è continuo, cioè ha dei fori, o è addirittura formato con una rete metallica. Così elettrizzando, anche fortemente, una campana di rete metallica, nel suo interno non risiede elettricità; infatti attaccando dei pendolini tanto all'interno che all'esterno della reticella, solo quest'ultimi si vedono sollevare, (Fig. 277); mentre nell'interno neanche un elettroscopio E a

foglie d'oro dà indizio di alcuna elettrizzazione. Questa esperienza va sotto il nome di **gabbia di Faraday**, poichè il Faraday [1] nel 1837 l'aveva fatta con una grande gabbia tutta coperta di stagnola, nella quale entrava egli stesso con elettroscopi sensibilissimi.

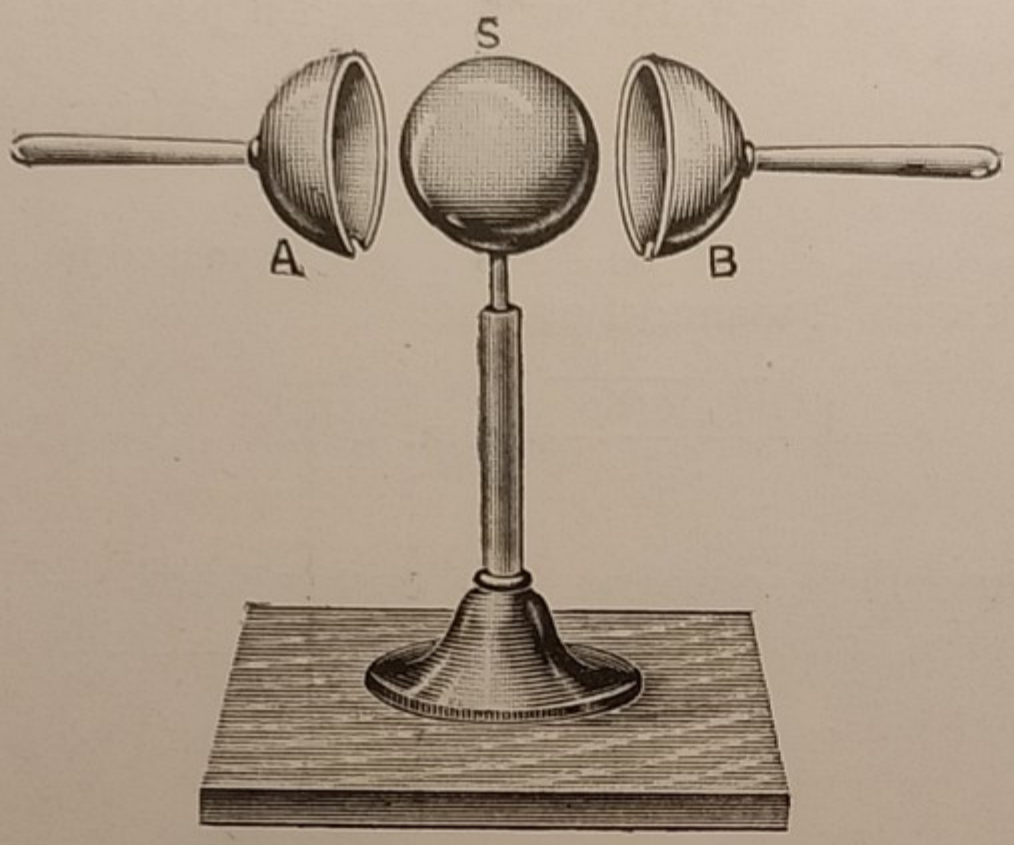


Fig. 276.

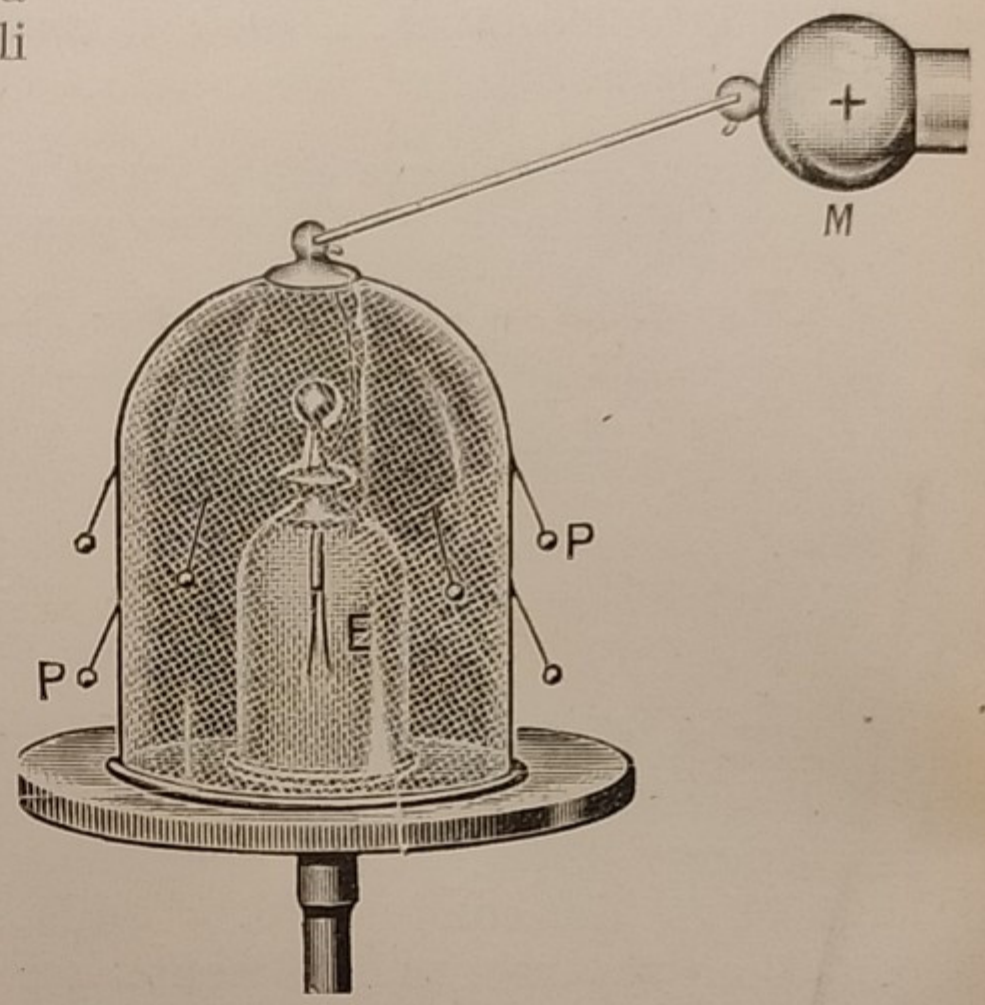


Fig. 277.

Un involucro conduttore protegge quindi da ogni azione elettrica esterna lo spazio da esso racchiuso; costituisce perciò uno **schermo elettrico.** Un involucro isolante non costituisce uno schermo; perchè se impedisce alla elettricità di passare per conduzione, non impedisce che si trasmetta per influenza (§ 166).

172. **Densità elettrica.** — Si chiama **densità elettrica** *in un punto, la quantità di elettricità che risiede sull'unità di superficie contenente quel punto.* L'elettricità alla superficie si distribuisce uniformemente solo nel caso che il conduttore abbia forma sferica; cioè su una sfera la densità è costante in ogni punto.

Se Q è la quantità di elettricità che risiede su tutta la sfera, ed R il raggio di questa, la superficie è $4\pi R^2$, e quindi la densità elettrica sarà:

$$2) \qquad \delta = \frac{Q}{4\pi R^2}.$$

Su un conduttore allungato l'elettricità non si distribuisce uniformemente; ma si accumula maggiormente alle estremità. La densità cresce cioè con la curvatura della superficie; perciò su un conduttore allungato la densità è maggiore al centro, ed è maggiore nelle parti convesse che nelle concave.

Infatti elettrizziamo un conduttore isolato, della forma della Fig. 278; tocchiamo col piano di prova la parte centrale E e portiamolo poi in con-

---

(1) Faraday Michael, grande fisico inglese; n. presso Londra nel 1791, m. presso Richmond nel 1867.

tatto con un elettroscopio, otterremo una certa divergenza nelle foglioline di questo; toccando invece l'estremità *A*, otterremo una divergenza maggiore.

Elettrizzando un conduttore flessibile, della forma della Fig. 279, munito di numerose striscioline di carta, queste si sollevano nelle parti convesse e non nelle concave.

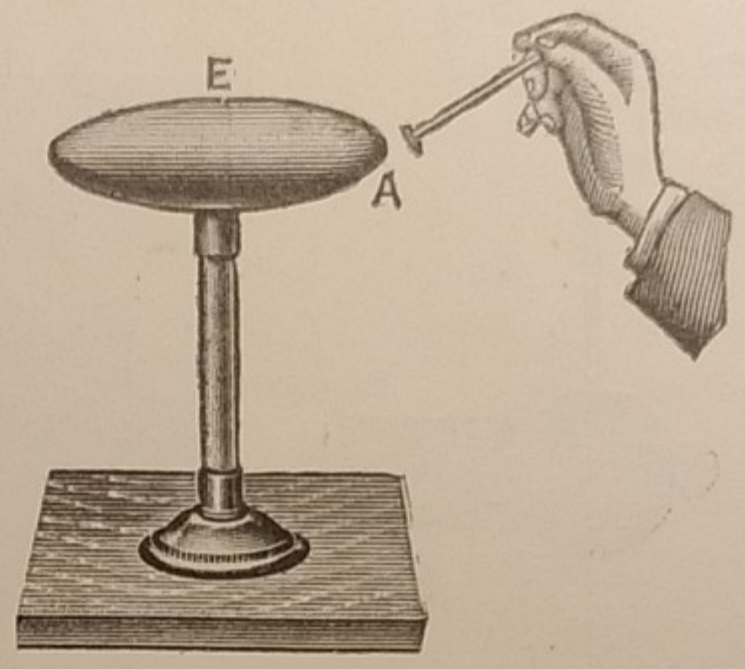


Fig. 278.

173. **Tensione elettrostatica.** — Si spiega perchè l'elettricità risieda alla superficie, pensando che vi sia ripulsione fra le singole cariche elettriche dello stesso segno, che risiedono nelle particelle interne di un conduttore; in modo che queste cariche tendono ad allontanarsi dal centro alla periferia. Ma anche alla superficie si dovrebbero esercitare queste azioni ripulsive, e l'elettricità dovrebbe abbandonare il conduttore; ciò non avviene perchè attorno al conduttore vi è il mezzo isolante che lo circonda, ad es. l'aria, che trattiene l'elettricità sulla superficie del corpo. Però si genera in tal guisa una pressione sull'isolante, che si chiama la **pressione o tensione elettrostatica.** Per conseguenza la tensione elettrostatica cresce su un conduttore col crescere della densità elettrica.

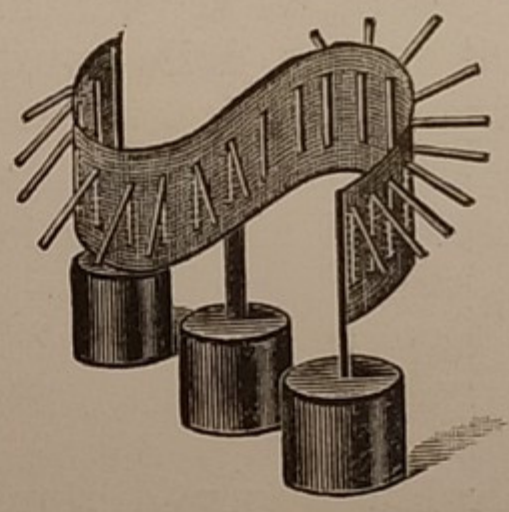


Fig. 279.

174. **Potere delle punte.** — Nel caso limite in cui il conduttore sia una punta aguzza, l'elettricità vi si accumula con una densità enorme; si genera allora una tensione così forte sull'isolante circostante (usualmente l'aria), che questo non può più trattenere l'elettricità, che così sfugge dal conduttore e si diffonde nell'aria che lo circonda.

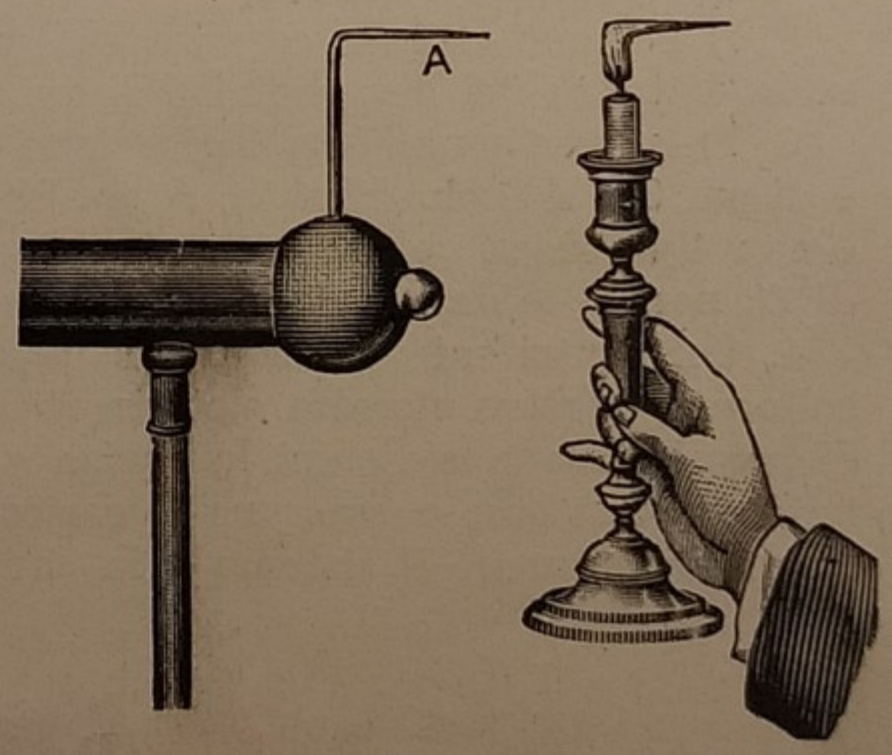


Fig. 280.

È questo il **potere delle punte**: cioè le punte lasciano sfuggire l'elettricità. Questa, uscendo, elettrizza l'aria dello stesso segno, che perciò viene respinta; si forma quindi avanti alla punta un **soffio o vento elettrico.** Infatti, ponendo una candela accesa avanti ad una punta *A* elettrizzata, la fiamma si piega e può anche spegnersi, (Fig. 280). Si faccia bene attenzione a non dire che il vento sia formato dall'elettricifà che esce dalla punta; perchè l'elettricità non è materia (§ 156), e non può fare vento.

L'aria respinta dalla punta, per reazione (Vol. 1° - § 88) spinge a sua volta la punta; e se essa è mobile, come nell'**arganetto elettrico** (Fig. 281), questo si mette a girare rapidamente.

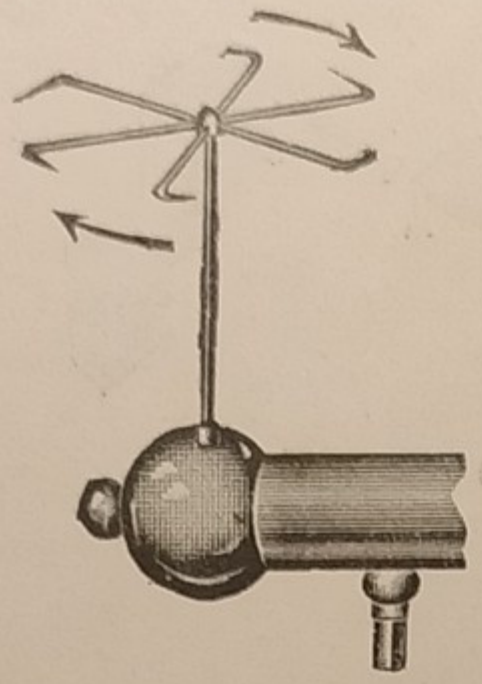


Fig. 281.

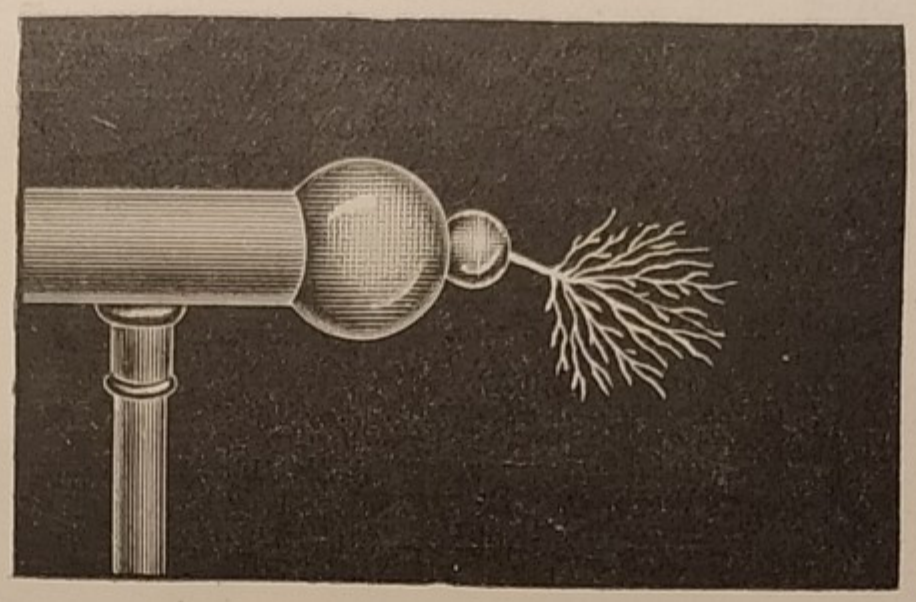


Fig. 282.

La dispersione dell' elettricità dalle punte è accompagnata da un fenomeno luminoso, visibile solo nell'oscurità; se dalla punta si disperde elettricità positiva, essa è circondata da un piccolo *pennacchio* di luce violacea (Fig. 282); se invece esce elettricità negativa, vi si vede alla estremità un punto luminoso, detto *stelletta*.

Per il potere delle punte bisogna evitare gli spigoli e le asperità in un conduttore elettrizzato, che sono causa di dispersione di elettricità; per tale ragione la bacchetta dell'elettroscopio e le estremità dei conduttori negli apparecchi di elettrostatica, sono sempre munite di palline metalliche.

Problemi da risolvere.

1. Calcolare la forza di ripulsione di due sfere cariche ciascuna di 0,0001 coulomb, se la distanza dei loro centri è di m. 10.

2. Una sfera elettrizzata di cm. 20 di raggio ha una carica di 10^{-8} coul. Calcolare:
   a) la densità elettrica;
   b) l'azione ch'essa esercita su un'altra sfera con una carica di 2×10^{-9} coul. se la distanza dei loro centri è di cm. 50.

3. Due sfere eguali A e B giacciono su un piano isolante; la distanza dei loro centri è di cm. 30; A è elettrizzata, B no. Si tocca A con una terza sfera C eguale ad esse, e con C si tocca poi B. In qual punto del segmento AB occorre collocare il centro di C, perchè le azioni ripulsive di A e B su di essa si facciano equilibrio?

4. Coi centri sui vertici di una losanga articolata, il cui lato è l = cm. 12, sono collocate quattro sferette elettrizzate dello stesso segno; quelle agli estremi di una diagonale hanno ciascuna la carica $q_1 = 5.10^{-6}$ coul. e quelle agli estremi dell'altra diagonale hanno ciascuna la carica $q_2 = 8.10^{-6}$ coul. Calcolare la lunghezza delle diagonali, allorchè il sistema è in equilibrio.

Potenziale.

175. **Potenziale elettrico.** — La legge di Coulomb (§ 169) riguarda le forze elettriche che si esplicano tra corpi elettrizzati, e le azioni di movimento che ne derivano. Poichè sappiamo che le forze in moto compiono lavoro (Vol. 1° - § 104), è ovvio pensare che un corpo elettrizzato sia suscettibile di compiere un lavoro.

Per la valutazione di questo lavoro, ricorriamo dapprima ad una analogia. Se da un serbatoio facciamo scaricare una quantità d'acqua di P litri (o kg.), che sia posta ad un certo livello di h metri dal suolo, sappiamo (Vol. 1° - § 106) che essa scendendo al suolo può compiere un lavoro di:

1) $$L = P \cdot h,$$

che non dipende solo dalla quantità d'acqua scaricata dal serbatoio, ma anche dal livello a cui essa si trova; il qual livello può variare indipendentemente dalla quantità d'acqua, a secondo la posizione del serbatoio.

Adunque l'acqua di un serbatoio può compiere un lavoro, che si ottiene moltiplicando la quantità di essa, per l'altezza da cui cade. Nella 1) per $P = 1$ si ha $h = L$; cioè l'altezza possiamo considerarla come il lavoro che può eseguire l'unità di quantità d'acqua (1 kg.), cadendo dal suo livello al suolo (*livello zero*); oppure, il che è equivalente, come il lavoro che occorre per innalzare l'unità di quantità d'acqua, dal suolo al livello a cui si trova.

Analogamente se da una sorgente di elettricità si scarica al suolo una certa quantità d'elettricità Q, questa può compiere un lavoro E, che possiamo ottenere moltiplicando la quantità Q per un certo numero V:

2) $$E = Q \cdot V;$$

lavoro che dipende non solo dalla quantità d'elettricità scaricata, ma anche da un certo *stato* o *condizione* a cui essa si trova. Questo *stato* dell'elettricità, che corrisponde al concetto di altezza o livello del liquido, chiameremo **potenziale elettrico** del corpo elettrizzato; e chiameremo *potenziale zero* quello del suolo o di un corpo diselettrizzato. Diremo perciò che una carica elettrica, scaricandosi, è suscettibile di compiere un lavoro, che si ottiene moltiplicando tale quantità di elettricità, per il suo potenziale.

Nella 2) facendo $Q = 1$, si ottiene $V = E$; cioè si può dire che:

il potenziale elettrico di un corpo elettrizzato è il lavoro chè può eseguire l'unità di elettricità, passando dalle condizioni in cui si trova nel corpo, al potenziale zero; oppure, il che è equivalente, *è il lavoro che occorre per portare l'unità di quantità di elettricità dal potenziale zero alle condizioni in cui si trova sul corpo.*

Una quantità d'acqua P cadendo dal livello h al livello h', cioè dell'altezza $h - h'$, compie un lavoro:

$$l = P\,(h - h').$$

Parimenti, una quantità di elettricità Q, passando da un corpo di potenziale V a un altro di potenziale V', compie il lavoro:

3) $$e = Q\,(V - V'),$$

che è proporzionale alla differenza di potenziale tra i due corpi.

In un corpo elettrizzato adunque, non basta considerare la quantità di elettricità che vi risiede; poichè l'effetto che si può trarne dipende anche dal suo potenziale. Così come abbiamo visto, per l'acqua di un serbatoio non basta considerare la quantità ma anche il livello a cui si trova; e per un gas racchiuso in un recipiente, occorre considerare oltre la quantità di esso anche la pressione a cui è sottoposto; come per il calore è necessario considerare la quantità di calore e la temperatura a cui si trova.

Quindi, con concetto più elementare ma più accessibile, potremo dire più grossolanamente:

Il potenziale, per i corpi elettrizzati, esprime ciò che è il livello per i liquidi, la pressione per i gas, la temperatura per il calore.

Il confronto del potenziale con la pressione di un gas, ci fa meglio concepire a che cosa esso sia dovuto. Ricordando che l'elettrizzazione di un corpo dipende dagli elettroni che esso contiene, il potenziale corrisponde alla densità con cui tali elettroni sono agglomerati nel corpo. Così, chiamando potenziale zero quello di un corpo allo stato neutro, il potenziale sarà positivo se tal corpo conterrà una quantità minore di elettroni, e sarà tanto più elevato quanto più radi sono gli elettroni in esso; il potenziale sarà invece negativo se il corpo conterrà quantità maggiore di elettroni, e sarà tanto più elevato quanto più gli elettroni abbonderanno nel corpo.

176. **Analogie idrauliche.** — Le seguenti altre analogie con un liquido chiariscono meglio il concetto di potenziale.

Si assume come *livello zero* quello del mare; si considera come positivo un livello superiore a quello del mare, come negativo, quello al di sotto.	Si assume come *potenziale zero* quello della terra; si considera come positivo il potenziale superiore a quello della terra, come negativo quello al di sotto.

Fra elettricità positiva e negativa cioè vi è solo differenza per il potenziale; essendo elettrizzati positivamente quei corpi il cui potenziale è maggiore di zero, e negativamente quelli a potenziale minore di zero.

Se si mettono in comunicazione due vasi contenenti liquido a diverso livello, scende il liquido dal vaso in cui il livello è più alto (anche se per essere stretto ne contiene una quantità più piccola) e va nel vaso in cui il livello è più basso, finchè in entrambi si dispone allo stesso livello.	Se si mettono in comunicazione due conduttori elettrizzati a diverso potenziale, l'elettricità passa da quello in cui il potenziale è maggiore (anche se possiede una quantità d'elettricità minore) all'altro, finchè i due conduttori non si dispongono entrambi allo stesso potenziale.

Si noti che questo passaggio di elettricità è una pura convenzione, un modo di dire per potersi esprimere con parole; perchè l'elettricità non è materia (§ 156) e nulla di materiale si muove da un conduttore all'altro. Avviene solo uno scambio di elettroni da un corpo all'altro.

Il livello di un liquido in un recipiente è eguale in tutti i punti della superficie superiore.	Il potenziale di un conduttore è eguale in tutti i punti della superficie esterna.
Lo stesso liquido in più vasi comunicanti si dispone allo stesso livello, qualunque sia la forma e la dimensione di questi.	L'elettricità in più conduttori posti in contatto si dispone allo stesso potenziale, qualunque sia la forma e la dimensione di essi.

177. **Unità di potenziale.** — Dalla 2) ricaviamo clie è:

$$V = 1 \qquad \text{per} \qquad E = 1 \qquad \text{e} \qquad Q = 1\,; \qquad \text{cioè:}$$

l'unità di potenziale è quella di un corpo in cui l'unità di quantità di elettricità, passando al potenziale zero, compie il lavoro di uno.

Se l'unità di elettricità è quella assoluta (§ 170), e per unità di lavoro si prende l'*erg* (Vol. 1° - § 105), si avrà l'**unità assoluta di potenziale,** nel sistema elettrostatico; essa non ha nome.

L'**unità pratica di potenziale** si avrà assumendo per unità di elettricità *1 coulomb* e per unità di lavoro *1 joule*; cioè *è quella di un corpo elettrizzato in cui 1 coulomb di elettricità compie il lavoro di 1 joule.* Tale unità si chiama **volta o volt,** (abbreviazione V).

Dalla 2) avremo ancora: $V = \dfrac{E}{Q}$ quindi:

$$1 \text{ volt} = \frac{1 \text{ joule}}{1 \text{ coulomb}} = \frac{10^7 \text{ erg.}}{3 \times 10^9} = \frac{10^{-2}}{3} \; (u.\,e.\,s.).$$

178. **Campo elettrico - Linea di forza.** — Dicesi campo elettrico *di un corpo elettrizzato, la regione dello spazio entro cui esso fa risentire la sua azione elettrica.* Quest'azione è quella di attrazione o ripulsione, misurata dalla legge di Coulomb (§ 169 - 1); essa è zero o se è zero il numeratore, cioè se è zero la carica elettrica del corpo e quindi se il corpo non è elettrizzato, e ciò è evidente: oppure è zero per $r = \infty$. Quindi, teoricamente, il campo elettrico si estende sino all'infinito. Praticamente però il campo si estende sino alla distanza a cui potremo renderlo sensibile con strumenti che ne risentono l'influenza; e quindi sempre sino a distanza limitata, e tanto maggiore quanto più alto è il potenziale del corpo elettrizzato. Così se un elettroscopio sensibile rivela l'influenza di un corpo elettrizzato comune sino a qualche metro di distanza, risente l'azione di una nube temporalesca anche a qualche chilometro; con la radiotelegrafia riusciamo ad estendere questa influenza tra due punti qualunque della Terra; e l'azione delle macchie solari (§ 152) ci dimostra l'estensione del campo elettrico del Sole a sì enorme distanza.

Sia P un corpo elettrizzato e A un punto del campo elettrico di P; se in A poniamo un punto materiale elettrizzato, su di esso P eserciterà una forza di attrazione o repulsione, il cui valore è dato dalla legge di Coulomb (§ 169 - 1). Se la carica di A è l'unità (§ 170), la forza risultante in tal caso si chiama l'**intensità del campo** di P in A. Cioè:

Intensità del campo elettrico in un punto di questo, è la forza che agisce su l'unità di quantità di elettricità posta in quel punto.

Se il campo è prodotto da una carica Q sul punto P ed r è la distanza di A da P, per la legge di Coulomb il valore della forza esercitata da P sull'unità di elettricità posta in A, e quindi l'intensità del campo in A, è dato da:

$$E = k\frac{Q}{r^2}.$$

Si dicono **linee di forza,** le linee secondo cui si esplica l'azione elettrica di un corpo elettrizzato. Cioè, se consideriamo un punto materiale elet-

trizzato, libero di muoversi nello spazio, esso per l'azione attrattiva o ripulsiva del corpo elettrizzato si muoverà secondo una traiettoria, *che è una linea di forza.*

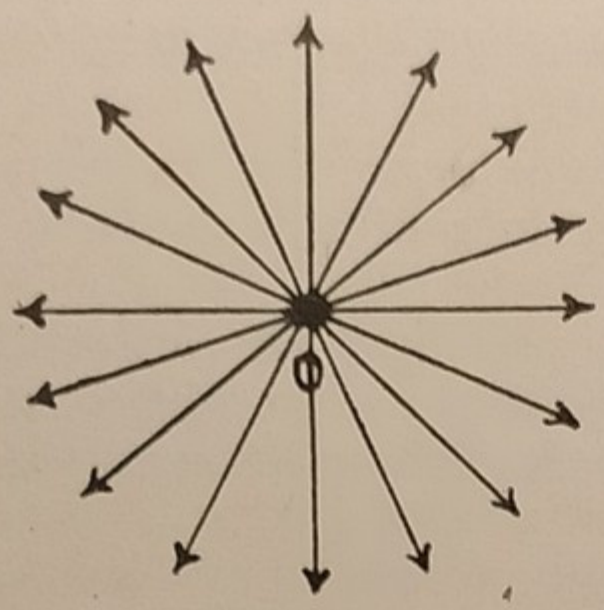


Fig. 283-*a*.

Se il corpo elettrizzato è un punto, manifestamente le linee di forza saranno tutti i raggi uscenti da esso, (Fig. 283-*a*). Nel caso invece di due punti elettrizzati di segno contrario, le linee di forza non sono più rettilinee; ma si deduce, con ragionamento analogo a quello fatto nel § 140, che sono curve che uniscono i due punti (Fig. 283-*b*).

La direzione della linea di forza in un punto, cioè la tangente alla linea di forza in quel punto, indica la *direzione del campo* in quel punto.

Si conviene che le linee di forza partano dal punto elettrizzato positivamente e vadano a quello elettrizzato negativamente; ma si noti che ciò è solo una convenzione.

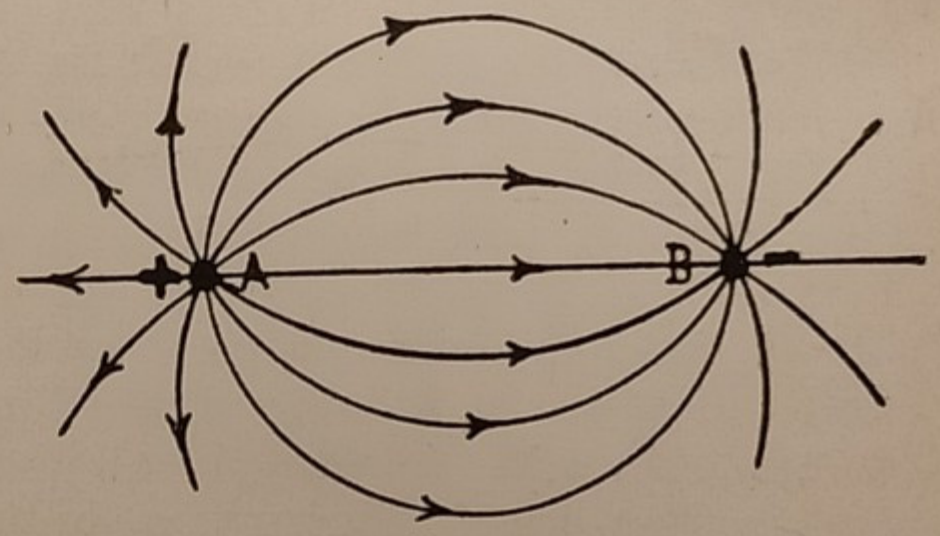


Fig. 283-*b*.

Si dice **campo uniforme** quello in cui le linee di forza sono parallele. Ciò sarebbe, teoricamente, solo nel caso che il campo fosse generato da un punto elettrizzato, posto a distanza infinita. Praticamente si può ottenere un campo pressochè uniforme, fra due dischi conduttori *A* e *B* (Fig. 284), elettrizzati di segno contrario, con le facce parallele e sufficientemente vicine, *nella parte centrale*; vicino agli orli il campo non è più uniforme.

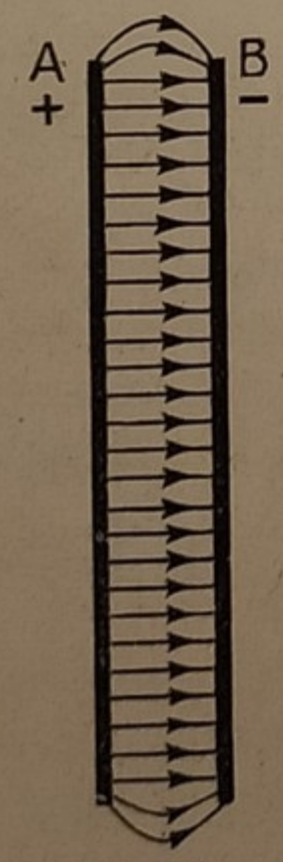


Fig. 284.

Nel senso geometrico per ogni punto dello spazio dovrebbe passare una linea di forza; considerando una superficie qualsiasi nel campo, essendo essa costituita da infiniti punti, sarebbe attraversata in ogni caso da infinite linee di forza. Noi tuttavia, in senso fisico, conveniamo che il numero di tali linee di forza sia limitato, e proporzionale all'intensità del campo in quel punto. Così, ad es., convenendo che un campo uniforme di intensità *uno* sia rappresentato da *una linea di forza per cm²*, un campo d'intensità *F* sarà rappresentato da *F* linee di forza per cm².

Chiamasi **flusso di forza,** l'insieme delle linee di forza che attraversano una data superficie del campo. Quindi l'intensità del campo in un punto, sarà misurata dal flusso di forza che attraversa l'unità di superficie, perpendicolare alle linee di forza e contenente quel punto.

179. **Potenziale in un punto.** — Supponiamo di avere un punto materiale *A* nel campo di un corpo elettrizzato *P*; sia *Q* la quantità di elettricità su *P* e consideriamo su *A* l'unità di elettricità positiva. *A* sarà sollecitato a muoversi per l'azione di *P*, con una forza eguale all'intensità del campo

in A. Supponiamo che il punto A si allontani sino a non risentire più l'azione di P, cioè sino al limite del campo di questo; con ciò si compirà un lavoro: positivo se la carica Q è positiva, perchè allora A si muove respinto da P, e produce lavoro; negativo nel caso contrario, perchè occorrerà impiegare una forza per allontanare A da P e bisognerà spendere un lavoro.

Chiameremo il numero che misura tale lavoro: **potenziale del corpo P nel punto A del campo,** e lo indicheremo con V_A. Si dimostra che se r è la distanza di A da P, il potenziale in A è (nel vuoto o sensibilmente nell'aria):

$$4) \qquad V_A = \frac{Q}{r} .$$

Ripetendo adunque chiamasi: *potenziale di un corpo elettrizzato, in un punto del suo campo, il numero che misura il lavoro compiuto dalle forze elettriche allorchè l'unità di elettricità positiva passa da quel punto all'infinito.*

È chiaro che per trasportare la carica $+q$, anzichè l'unità, occorre un lavoro q volte maggiore, cioè:

$$5) \qquad L_q = \frac{Q\,q}{r} .$$

180. **Superficie equipotenziale.** — Dalla 4) risulta che il potenziale di un punto elettrizzato varia con r, diminuendo man mano che ci allontaniamo da esso, fino ad annullarsi per $r = \infty$. Il potenziale perciò ha lo stesso valore in tutti i punti la cui distanza dal punto elettrizzato è costante; cioè su una superficie sferica, avente il centro nel punto elettrizzato. Una tale superficie si chiama **superficie equipotenziale.**

È chiaro che: *il lavoro necessario per trasportare un punto elettrizzato lungo una superficie equipotenziale è nullo.* Infatti in tal caso le forze elettriche agendo nella direzione del raggio della superficie equipotenziale, cioè perpendicolarmente alla direzione dello spostamento, il lavoro compiuto da esse è nullo (Vol. 1° - § 104).

Abbiamo visto (§ 171) che l'azione elettrica risultante è nulla nei punti interni di un conduttore qualsiasi; quindi è nullo il lavoro occorrente per trasportare una carica lungo la superficie del conduttore, e nell'interno di esso; cioè: *tutti i punti di un conduttore qualsiasi tanto interni che alla superficie, devono essere allo stesso potenziale.* La superficie del conduttore è perciò una superficie equipotenziale.

Nella Fig. 285-*a* è rappresentato il campo di una sfera elettrizzata S, con le linee di forza e le superfici equipotenziali; la prima superficie equipotenziale è quella della sfera S; le altre sono tutte sfere concentriche ad S.

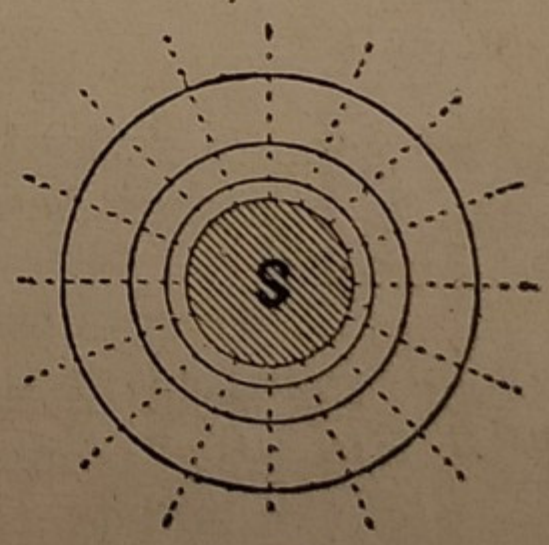


Fig. 285-*a*.

Il potenziale V di S sarà in questo caso quello che si avrebbe in un punto della sua superficie, se tutta la carica di S fosse concentrata nel suo centro; quindi, se R è il raggio della sfera, e Q la sua carica elettrica, sarà:

$$6) \qquad V = \frac{Q}{R} .$$

Nella Fig. 285-*b* è rappresentato il campo di due punti A e B elettrizzati con cariche eguali ma di segno contrario; le linee punteggiate rappresentano le linee di forza, che hanno l'andamento già visto in Fig. 283-*b*; le linee

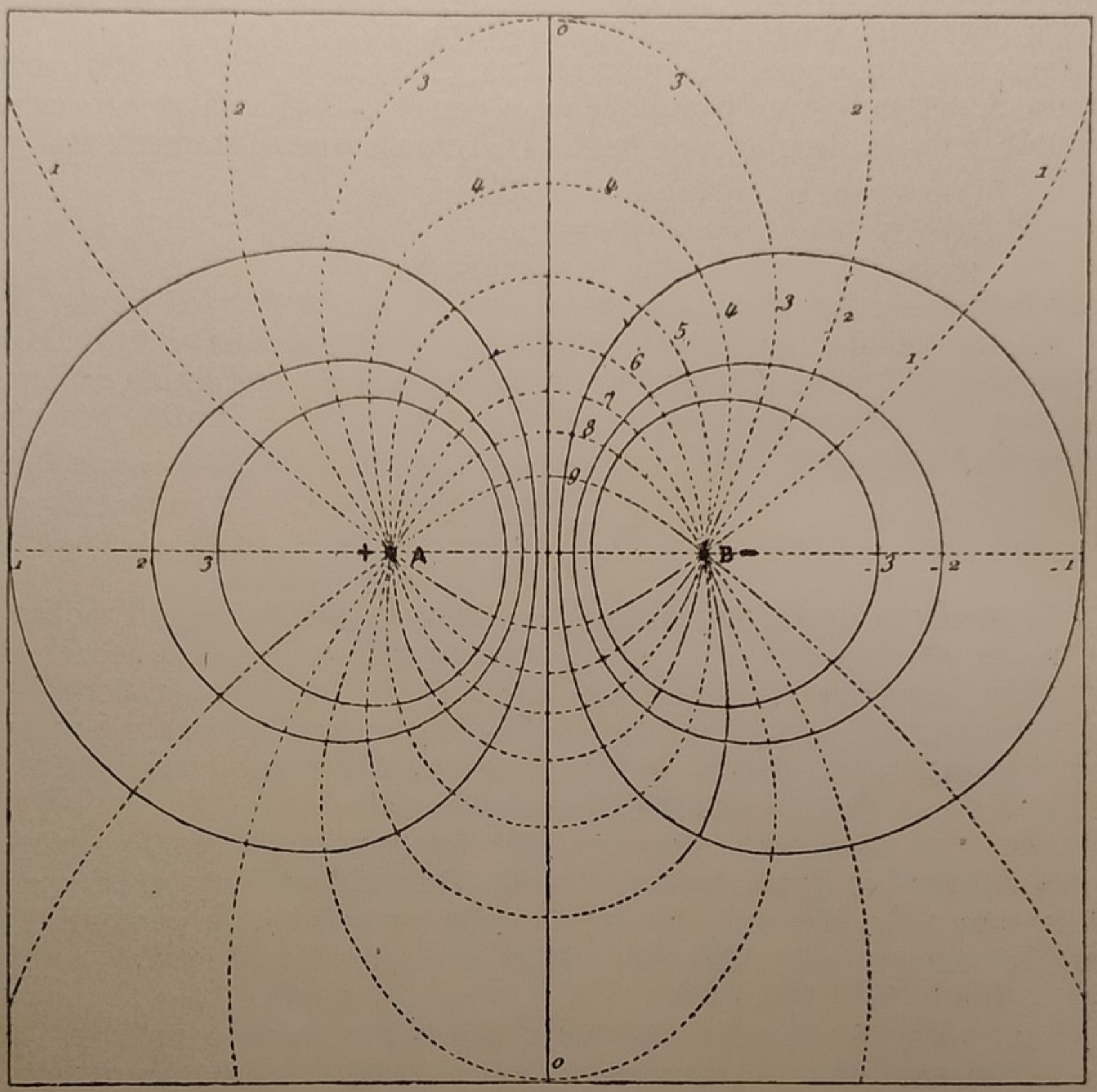


Fig. 285-*b*.

intere sono le sezioni delle superfici equipotenziali. Notiamo che in ogni caso: *le superfici equipotenziali sono normali in ogni punto alla direzione del campo.*

181. **Energia di un conduttore elettrizzato.** — Il concetto di potenziale ci fa meglio comprendere come un corpo elettrizzato possa produrre lavoro, e quindi possieda energia (Vol. 1° - § 118); rimane così confermato che l'elettricità è una forma di energia (§ 159).

Il lavoro che può produrre un peso P di acqua, contenuta in un vaso cilindrico (ad asse verticale) sino all'altezza h, non è Ph; perchè non tutta l'acqua scende al suolo dall'altezza h, ma da un'altezza decrescente man mano che il vaso si vuota. Si può dimostrare, e s'intuisce facilmente, che tale lavoro è la metà di Ph, cioè: $\frac{Ph}{2}$. Parimenti, il lavoro che può fornire

una quantità di elettricità Q, che risieda in un conduttore al potenziale V, non è QV ma:

$$E = \frac{QV}{2}; \qquad 7)$$

questo lavoro pertanto misura l'**energia del conduttore elettrizzato.**

Problema. — *A che potenziale deve trovarsi un corpo elettrizzato, con la carica di* 5×10^{-7} *coulomb, perchè possa compiere scaricandosi, un lavoro capace di sollevare un corpo del peso di g. 2 a cm. 15 di altezza?*

Soluzione. — Porremo nella 7), (ricordando che: 1 kgm. = 9,8 joule; Vol. 1° - § 105):

E = kg. 0,002 × m. 0,15 = kgm. 0,0003 = (0,0003 × 9,8) joule = 0,00294 joule;
Q = 0,0000005 coulomb; si ha perciò:

$$V = \frac{2E}{Q} = \frac{0{,}00588}{0{,}000\,000\,5} \text{ volt} = \mathbf{11760 \text{ volt}}.$$

182. **Elettrometri.** — Si chiamano **elettrometri** gli strumenti adoperati per la misura dei potenziali. Essi sono generalmente basati sulla misura delle forze attrattive o ripulsive che il corpo elettrizzato esercita su altri corpi.

Il più semplice è l'elettroscopio a foglie d'oro, descritto al § 165, a cui si aggiunga una graduazione che permetta di misurare la divergenza delle foglioline. Questa diver-

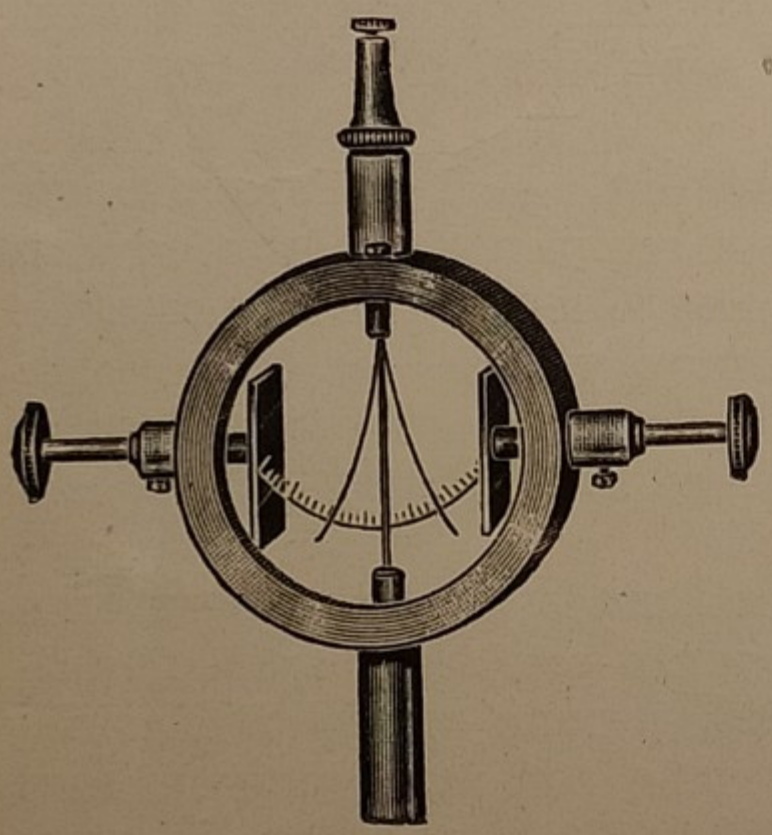


Fig. 286.

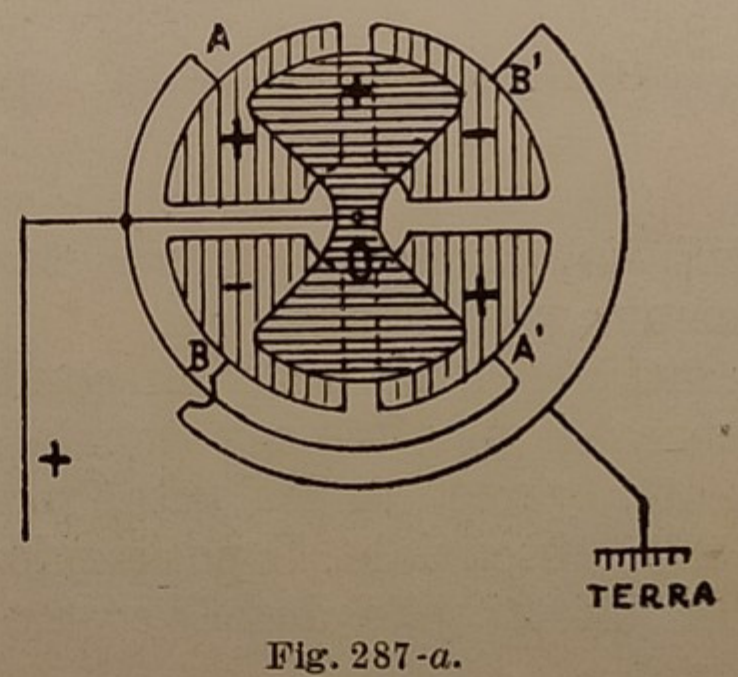


Fig. 287-*a*.

genza cresce col potenziale, si può quindi formare una tabella che dia per ogni posizione delle foglioline, il valore corrispondente del potenziale. La Fig. 286 mostra l'*elettrometro di Exner* costruito con tale principio.

Questi elettrometri a foglie sono semplici, ma non molto sensibili, e quindi non molto esatti. Osservando le foglioline ad occhio nudo, è solo possibile valutare potenziali di qualche centinaio di volt; osservandole invece con un microscopio, si può spingere la sensibilità fino ad una diecina di volt.

Assai migliore è l'**elettrometro a quadranti.** Esso si compone di due coppie di quadranti metallici AA' e BB' (Fig. 287-*a*), disposti su un medesimo piano orizzontale, bene isolati; i quadranti AA' sono riuniti tra loro con un sottile filo conduttore, e così pure BB'. Un leggero *ago* di alluminio O, avente la forma di un 8, è sospeso al di sopra dei quadranti, senza toccarli. Spesso ai quadranti si dà la forma dell'**elettrometro di Mascart,** di scatolette

cilindriche nel cui interno si muove l'ago (Fig. 287-*b*); questo è sospeso con un filo sottilissimo di bozzolo o di quarzo, e porta inferiormente una sottile asticella di platino, che s'immerge in un bicchiere *A* contenente acido solforico; ciò allo scopo di comunicare elettricità all'ago, non potendo farlo per il filo di sospensione che è isolante.

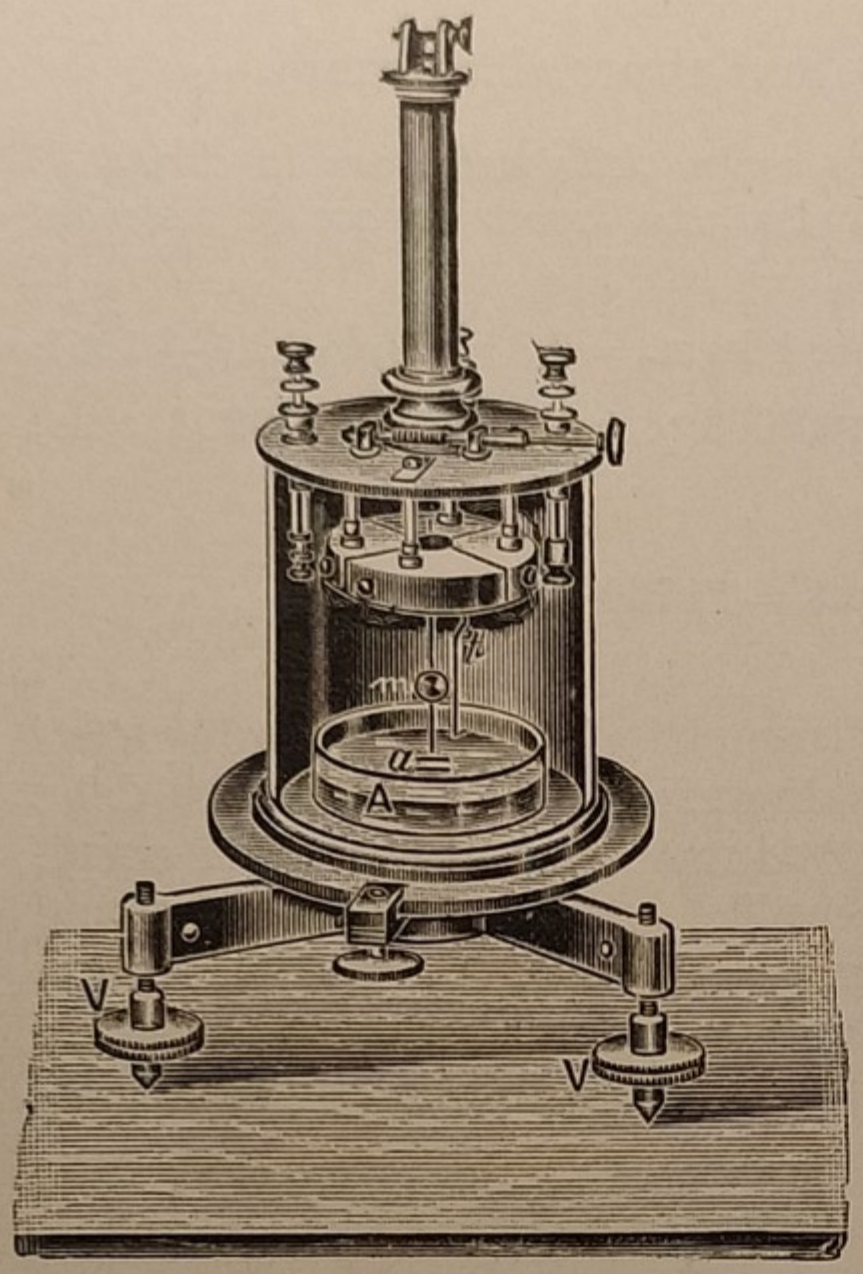


Fig. 287-*b*.

Per misurare il potenziale di un corpo elettrizzato, si pone questo in comunicazione con l'ago, e con la coppia di quadranti AA'; mentre la coppia BB' è in comunicazione con la terra. L'ago allora è respinto da AA' elettrizzati dello stesso segno, ed attratto da BB' elettrizzati per influenza (§ 166) di segno contrario: quindi ruoterà di un certo angolo che si misura per mezzo del metodo del *cannocchiale e scala* (§ 304). Dal valore dell'angolo si deduce il valore del potenziale.

Questo elettrometro permette di raggiungere la sensibilità di 0,001 volt.

183. **Scintilla.** — Per fare passare acqua da un recipiente più alto ad uno più basso, non è necessario disporre un tubo di comunicazione tra i due recipienti; può passare sotto forma di zampillo, nell'aria, ed andare anche lontano qualche metro, purchè sia spinta da sufficiente pressione.

Parimenti l'elettricità da un conduttore elettrizzato ad alto potenziale, può passare ad un altro a potenziale minore, senza conduttore di comunicazione, attraverso un isolante, p. es. nell'aria, purchè vi sia sufficiente differenza di potenziale. Il passaggio allora avviene con produzione di luce e con altri effetti, che descriveremo in seguito (§ 197) e si forma **la scintilla elettrica.**

Si chiama **distanza esplosiva,** la distanza fra i punti più vicini dei conduttori tra cui avviene la scintilla. Perchè la distanza esplosiva sia di 1 mm, per formarsi la scintilla occorre vi sia la differenza di potenziale di circa 5000 *V*; questo numero può variare con la forma e grandezza dei conduttori e con lo stato isolante del mezzo che li separa.

Ma per 10 mm. di distanza esplosiva, non occorrono (10 × 5000) *V*; ne bastano 26000 e per 100 mm. circa 56000. Cioè non vi è proporzionalità tra la differenza di potenziale e la distanza esplosiva; ma questa cresce più rapidamente.

La tabella seguente dà i valori della differenza di potenziale per scariche nell'aria a pressione ordinaria, fra due sferette di 1 cm. di diametro:

distanza espl. *mm*:	1	5	10	15	20	30	50	100	150
diff. di pot. *volt*:	4830	16890	25440	29340	31350	37200	45900	56100	61800

184. **Forza elettromotrice.** — La causa che spinge l'acqua da un vaso ad un altro, non è la differenza di livello; infatti, come è noto (Vol. 1° - § 47), la causa del moto deve essere una forza; mentre la differenza di livello è una lunghezza e non una forza. Ma dalla differenza di livello ha origine *una pressione*, che è la forza che spinge l'acqua da un recipiente all'altro e che, come sappiamo, si misura con la stessa unità con cui si misura la differenza di livello; cioè in centimetri.

Parimenti, la causa che spinge l'elettricità da un conduttore ad un altro, non è la differenza di potenziale; ma una forza che trae origine da essa, che si chiama la **forza elettromotrice,** (abbr. *f.e.m.*); anche questa viene misurata in *volt*.

Problemi da risolvere.

1. Una sferetta di metallo, venendo in contatto con un conduttore elettrizzato A al potenziale di $+5000\,V$, acquista una carica di 4×10^{-11} coul. Essa è attratta da un altro conduttore elettrizzato B, al potenziale di $-3000\,V$, alla distanza di cm. 50. Calcolare:

a) il lavoro che compie la sferetta passando da A a B;

b) il valore della forza media con cui la sferetta è sollecitata in tale movimento.

2. Qual'è il lavoro occorrente per portare la carica di 5 coulomb da un punto del campo in cui il potenziale è 7 volt ad un altro punto in cui il potenziale è 3 volt?

3. In un punto dello spazio è concentrata una quantità d'elettricità di $+500$ (*u.e.s.*). Calcolare il lavoro prodotto da tale carica, se una piccola sfera elettrizzata con la carica di $+30$ (*u.e.s.*) passa dalla distanza di 20 cm. alla distanza di 130 cm. dal punto producente il campo.

4. Qual potenziale (in volt) assume una sfera isolata, del diam. di cm. 60, caricata con una quantità di elettricità di 2×10^{-7} coulomb?

5. In un vertice di un triangolo equilatero, il cui lato è l = cm. 25, si trova una carica elettrica positiva, eguale a $+15 \times 10^{-8}$ coul. Determinare il potenziale nel centro del cerchio iscritto al triangolo.

Capacità elettrostatica.

185. **Capacità di un conduttore.** — Si abbia un pallone contenente aria; diremo ch'esso ha la capacità di 5 litri, non perchè contenga 5 litri d'aria; esso ne può contenere quanta se ne vuole, se compressa, e più aria vi mettiamo, più aumenta la sua pressione nel recipiente. Ma se il pallone ha la capacità di 5 litri, vuol dire che può contenere 5 litri d'aria alla pressione di 1 atmosfera (Vol. 1° - § 165). Oppure, il che è equivalente, che *occorrono 5 litri d'aria per portare la pressione nel recipiente da zero* (il vuoto) *ad 1 atmosfera.*

Parimenti, un conduttore può contenere tanta elettricità quanto si vuole; più ne diamo, più aumenta il suo potenziale; ma chiameremo *capacità elettrostatica del conduttore, la quantità di elettricità che si richiede per innalzare il suo potenziale da zero ad uno.*

Se perciò un conduttore con la carica Q di elettricità assume da zero il potenziale V, la sua capacità sarà:

$$1) \qquad C = \frac{Q}{V}\,; \qquad \text{da cui:} \qquad Q = CV\,.$$

Per un conduttore sferico di raggio R, essendo $V = \frac{Q}{R}$ (§ 180), si ottiene sostituendo nella 1):

2) $$C = R.$$

Cioè, in un conduttore sferico la capacità ed il raggio sono misurati dal medesimo numero.

Problema. — *Qual'è il lavoro necessario per caricare una sfera conduttrice isolata, di cm. 40 di diametro, con una carica di 0,003 coulomb?*

Soluzione. — Si ha (§ 170):

$$0{,}003 \text{ } coul. = 0{,}003 \times 3 \times 10^9 \text{ } (u.\ e.\ s.) = 9\,000\,000 \text{ } (u.\ e.\ s.).$$

La capacità della sfera, essendo il raggio di cm. 20, è per la 2): $C = 20$ $(u.\ e.\ s.)$.

Il potenziale di essa è per la 1): $V = \frac{Q}{C} = \frac{9\,000\,000}{20} (u.\ e.\ s.) = 450\,000$ $(u.\ e.\ s.)$.

Il lavoro richiesto è perciò (§ 181):

$$L = \frac{Q\,V}{2} = \frac{9\,000\,000 \times 450\,000}{2} \text{ } erg = 2025 \,.\, 10^9 \text{ } erg = \mathbf{202\,500 \text{ } joule.}$$

186. **Unità di capacità.** — Nella 1) sarà $C = 1$ per $Q = V = 1$; cioè:

l'unità di capacità è quella di un conduttore in cui l'unità di quantità di elettricità innalza il potenziale di uno.

Tale unità, per la 2) che fa una capacità equivalente ad una lunghezza, si chiama **centimetro** (cm.), ed è molto adoperata nella radiotelefonia.

Se per Q e V assumiamo le unità pratiche, risulterà anche per la capacità l'unità pratica. Essa si chiama **farad** (abbrev. *f*) ed è quindi: *la capacità di un conduttore che richiede 1 coulomb per innalzare il potenziale di 1 volt.*

Tale unità è però molto grande, poichè corrisponde alla capacità di una sfera isolata 1400 volte più grande della Terra. Onde si adopera più frequentemente il **microfarad** (abbrev. μf), cioè un milionesimo di farad, che equivale alla capacità di una sfera isolata di circa km. 9 di raggio.

Il *farad* vale 9×10^{11} *cm.*, ed il *microfarad* 9×10^5. In radiotelefonia si prende comunemente, con approssimazione: *1 cm. = 0,000001 microfarad.*

La capacità della Terra è in unità assolute, quanti cm. è il suo raggio (§ 185), cioè 6371×10^5; e in microfarad:

$$C = \frac{6371 \times 10^5}{9 \times 10^5} \text{ } microfarad = 708 \text{ } \mu f.$$

187. **Leggi della capacità.** — Con l'esperienza si dimostrano le seguenti leggi:

1. La capacità di un conduttore cresce proporzionalmente alla superficie esterna di esso. Ciò è intuitivo, avendo visto che l'elettricità risiede alla superficie del conduttore; ed equivale al fatto che la capacità di un recipiente dipende dalle dimensioni di questo.

La verifica sperimentale si può fare prendendo un elettroscopio, che al posto della pallina porta un piattello di metallo A, (Fig. 288); su questo è ammucchiata una catenella C pure di metallo. Si elettrizza l'elettroscopio,

con che gli si comunica una certa carica Q di elettricità; le foglioline divergono con un certo angolo fo, cioè assumono un dato potenziale V. Ora con una bacchetta isolante B solleviamo la catenella, pur lasciandone un capo in contatto col disco; vedremo le foglioline accostarsi in $f'o'$, cioè diminuire il potenziale. E poichè supponiamo che nel frattempo non siasi dispersa elettricità, cioè che la carica Q sia rimasta invariata, concludiamo che svolgendo la catenella è cresciuta la capacità del sistema. Ora, quando si svolge la catenella la superficie esterna di essa è certamente maggiore che quando è ammucchiata; la legge è quindi (qualitativamente) verificata.

2. *La capacità di un conduttore cresce se vi sono altri conduttori vicini, ma isolati da esso.* L'influenza di un conduttore vicino non s'intuisce con l'analogia dei recipienti; ma si comprende quando si pensi all'induzione elettrostatica che si stabilisce fra i due conduttori.

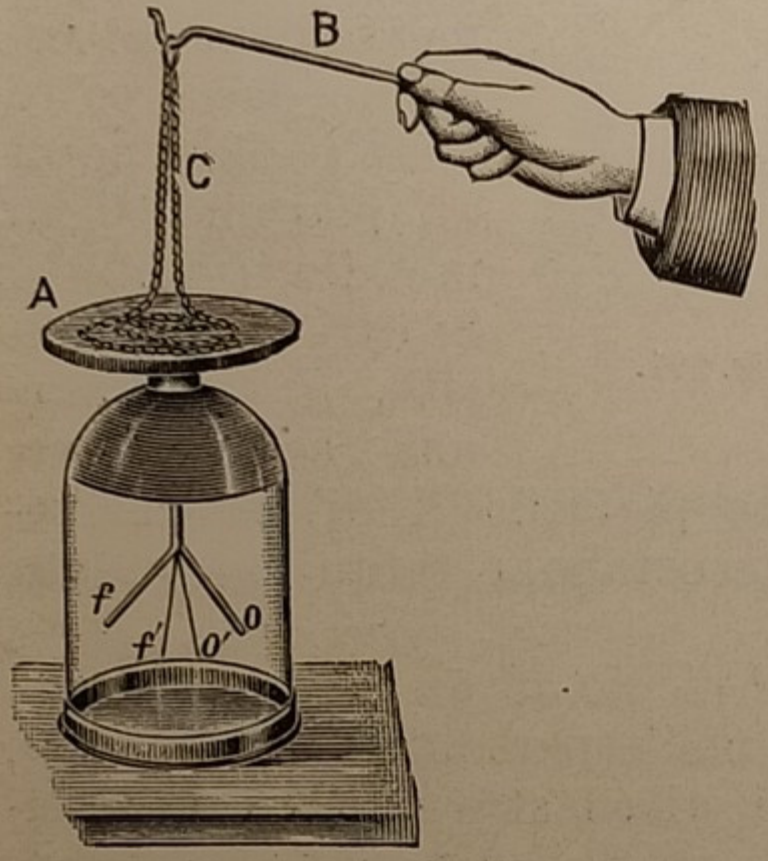


Fig. 288.

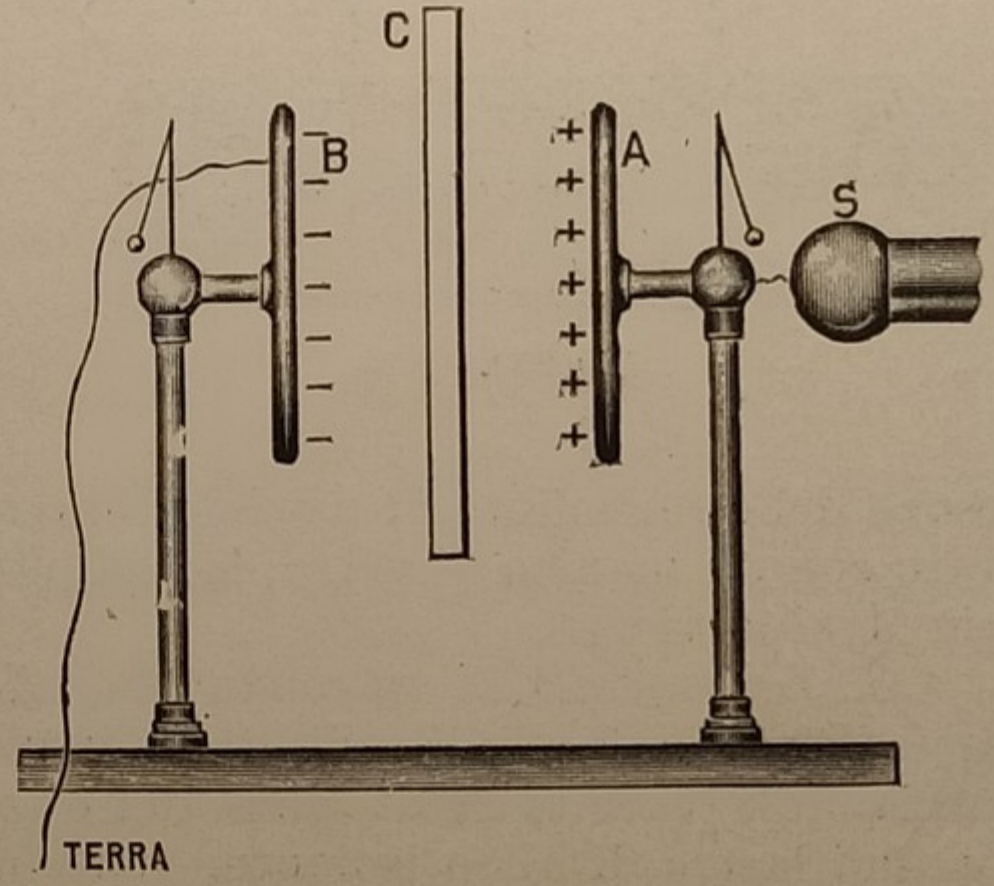


Fig. 289.

Infatti, sia A un conduttore elettrizzato; p. es., un disco di metallo posto in comunicazione con una sorgente S di elettricità positiva, a un dato potenziale, (Fig. 289). Poniamo di faccia ad esso un altro disco conduttore B, posto in comunicazione con la terra; fra i due dischi sia interposto un coibente C, che può essere semplicemente l'aria. Allora, per l'influenza di A, il conduttore B si elettrizza: nel punto più vicino, cioè tutto il disco, negativamente. Ma B a sua volta influenza A, e genera in questo nuova elettricità + aumentandone la carica; ma allora aumenta l'influenza di A su B e cresce la carica negativa di B; e così scambievolmente i due dischi si caricano sempre più di elettricità, *finchè A ha raggiunto lo stesso potenziale della sorgente S con cui comunica.* Ma per arrivare a questo potenziale, abbiamo dovuto accumulare su A più elettricità che se non vi fosse stato vicino B; cioè ne abbiamo aumentato la capacità.

Dimostrata l'influenza di B su A si comprende che essa dipenda anche dalla distanza dei due dischi: più essi sono vicini, più cresce la capacità di A. Difatti, elettrizziamo il disco B (Fig. 290), toccandolo con una bacchetta di vetro elettrizzata; un pendolino P con la sua divergenza, ne indica il potenziale. Avviciniamo ora di più A a B, il che può farsi agevolmente,

essendo i due dischi portati da sostegni isolanti, il cui piede può scorrere in apposite guide del basamento; il pendolino si abbassa, cioè il potenziale diminuisce; e poichè nel frattempo B non ha perduto elettricità, vuol dire che *la sua capacità è cresciuta.* Allontanando A, il pendolino torna a sollevarsi, cioè cresce il potenziale di B e la sua capacità diminuisce.

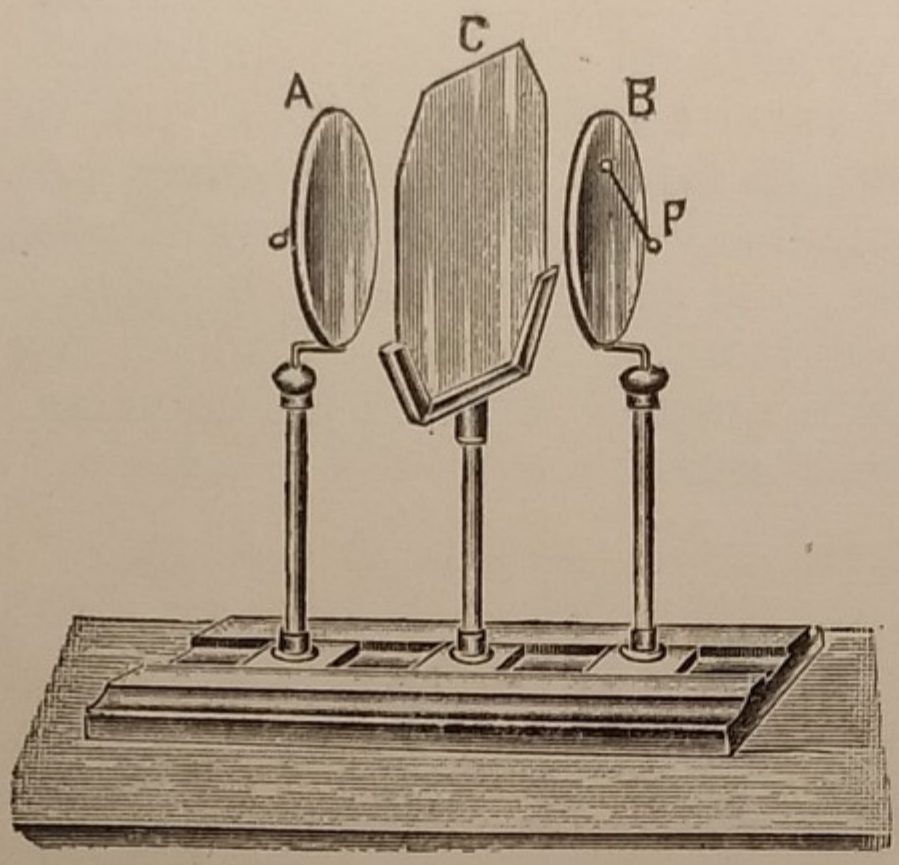


Fig. 290.

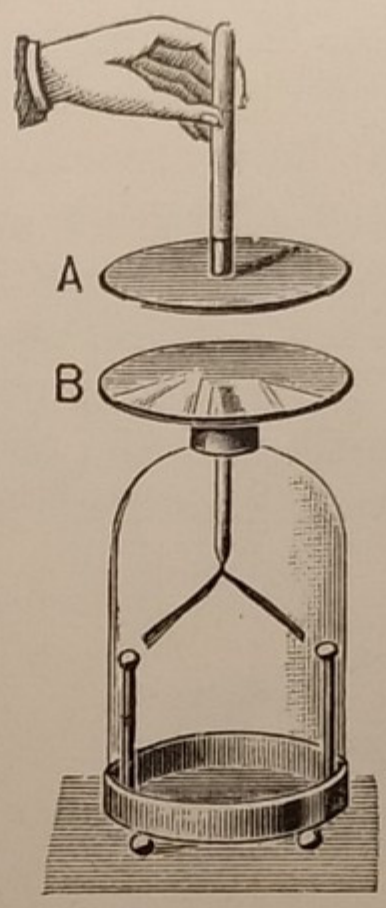


Fig. 291.

L'esperienza si può eseguire più comodamente per mezzo di un elettroscopio, che al posto della pallina porta un piattello B di metallo, (Fig. 291). Si carica di elettricità, e si ottiene una certa divergenza delle foglioline. Si avvicini ora un altro piattello A di metallo, tenuto con un manico di vetro; le foglioline si accostano, e tanto più quanto più A si avvicina.

3. La capacità di un conduttore, allorchè è vicino ad un altro conduttore, varia con la natura del coibente interposto. Se nell'esperienza della Fig. 290, lasciando invariata la distanza dei due dischi, alla lastra di vetro C sostituiamo lastre di altro isolante, vedremo ogni volta il pendolino assumere divergenze diverse; cioè il potenziale e quindi la capacità di B dipendono dalla natura dell'isolante interposto.

188. **Costante dielettrica.** — Si può allora stabilire un numero che esprime quante volte è la capacità di B se lo spazio tra A e B è ripieno di un dato isolante, p. es. di vetro, rispetto alla capacità che avrebbe se a quell'isolante si sostituisse il vuoto (o praticamente l'aria).

Questo numero si chiama **il potere induttore specifico** o anche **la costante dielettrica** dell'isolante interposto, e s'indica con K. Esso è uguale ad $1/k$, cioè all'inversa del coefficiente k che comparisce nella formula 1) della legge di Coulomb (§ 169); cioè la *costante dielettrica* per l'elettricità corrisponde alla *permeabilità* (§ 145) per il magnetismo. La costante dielettrica è stata determinata per gli isolanti più noti; per un dato isolante dipende anche dalla temperatura:

Ebanite	circa	2,7	Mica	circa	7
Paraffina	»	2,2	Zolfo	»	3,2
Porcellana	»	4,4	Alcool	»	25
Gomma lacca	»	3,1	Benzina	»	2,3
Vetro	da 5 a 10		Acqua (pura)	»	80

Condensatori.

189. **Leggi dei condensatori.** — Nel capitolo precedente abbiamo visto che la capacità di un conduttore cresce, se si avvicina ad esso un altro conduttore. In questo modo si ha la possibilità di accumulare, di condensare, su un conduttore, una grande quantità di elettricità. Si forma cioè **un condensatore**; che è appunto costituito da *due conduttori, separati da un coibente*. I due conduttori si chiamano **le armature** del condensatore.

La capacità di un condensatore è la capacità di un'armatura, allorchè l'altra è in comunicazione col suolo; dipende evidentemente dagli stessi elementi visti nel paragrafo precedente; cioè:

1. è direttamente proporzionale alla superficie S *delle armature;*

2. è inversamente proporzionale alla distanza d *di esse;*

3. è direttamente proporzionale al potere induttore specifico K *del coibente interposto.*

Tali leggi sono racchiuse nella formula:

$$1) \qquad C = K \frac{S}{4 \pi d}.$$

Si chiama **potere condensante** di un condensatore, il rapporto $\frac{C}{C'}$ fra la sua capacità C e quella C' che avrebbe ciascuna armatura se fosse isolata e lontana dall'altra.

Problema. — *Qual'è in* microfarad *la capacità di un condensatore piano, le cui armature sono due dischi del diametro di cm. 20, separate da un foglio di mica dello spessore di mm. 0,5?*

Soluzione. — La formula da applicare è la 1) in cui:

$K = 7$, (§ 188); $S = \text{cm}^2\,(100 \times \pi)$; $d = \text{cm. } 0{,}05$; sarà perciò:

$$C = K \frac{S}{4 \pi d} = \frac{7 \times 100 \times \pi}{4 \times 0{,}05 \times \pi}\,(u.\,e.\,s.) = 3\,500\,(u.\,e.\,s.) = \frac{3\,500}{9 \times 10^5}\,\mu f = \mathbf{0{,}004}\,\mu f\,(\text{circa}).$$

190. **Varie forme di condensatori.** — Pur rimanendo nei limiti della definizione, possiamo dare al condensatore forme diverse. Quello descritto nella Fig. 290 è già una delle forme usate e si chiama il **condensatore di Epino**; i due dischi A e B sono le due armature.

Il **quadro fulminante di Franklin** [1] (Fig. 292), è una lastra di vetro che ha incollate sulle due facce due foglie di stagnola, che non arrivano all'orlo della lastra; le due foglie costituiscono le armature, la lastra di vetro il coibente.

Ma la forma più comune è **la bottiglia di Leyda** [2]. Essa si compone di una bottiglia di vetro, su cui sono incollate esternamente ed internamente

---

(1) Franklin Benjamin; n. presso Boston nel 1706, m. a Filadelfia nel 1790.

(2) Il nome deriva dalla *città* di Leyda, ove fu fatta la prima volta l'esperienza nel 1746, da Musschenbroek o dal suo allievo Cuneus.

due foglie di stagnola, (Fig. 293). Se il collo della bottiglia è tanto stretto da non permettere di incollare la stagnola interna, si può riempire la bottiglia di pezzetti di stagnola. La stagnola costituisce le armature, che si chiamano: *armatura esterna* ed *armatura interna*; esse non devono ricoprire la bottiglia fino al collo, perchè vi rimanga una sufficiente superficie isolante. L'armatura interna comunica con un'asticella di metallo, che attraversa il collo della bottiglia, ed è solitamente ripiegata ad uncino.

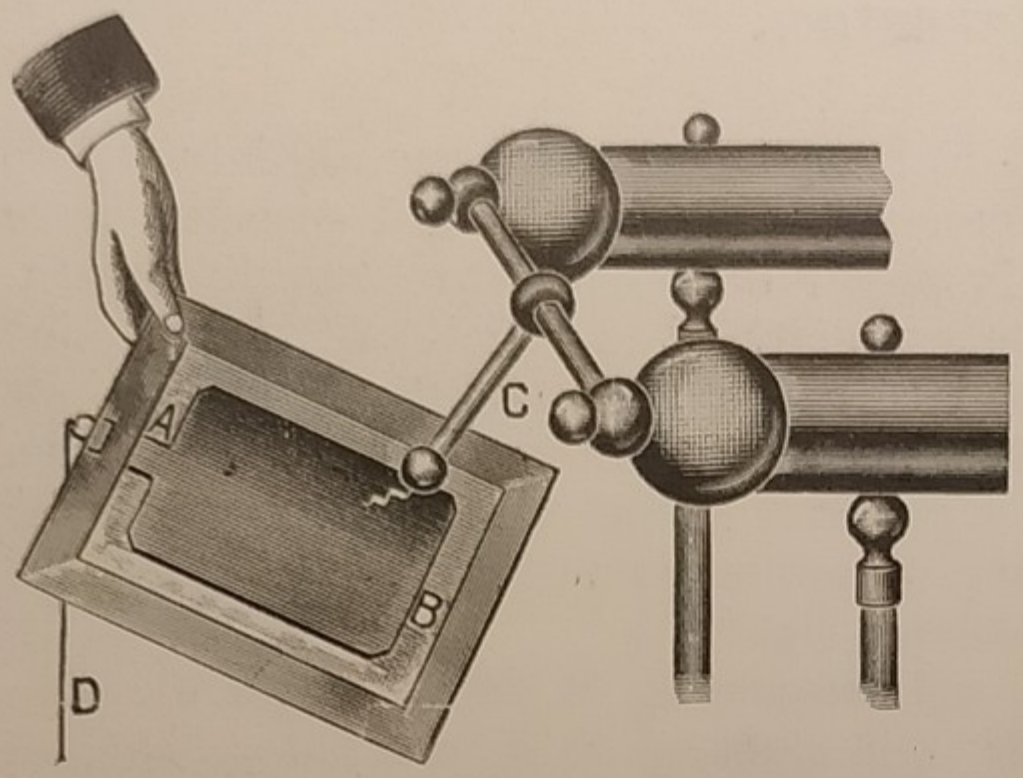


Fig. 292.

Fig. 293.

Si carica una bottiglia di Leyda, tenendola in mano per l'armatura esterna *B* (Fig. 294), ed avvicinando l'estremità *A* dell'armatura interna ad una sorgente *C* di elettricità (la *macchina elettrostatica* che descriveremo nel capitolo seguente). Il condensatore è carico allorchè il potenziale della sua armatura è uguale a quello della sorgente (§ 187 - 2); quindi il condensatore sarà carico allorchè tra la sua asticella ed il conduttore della macchina non scoccano più scintille.

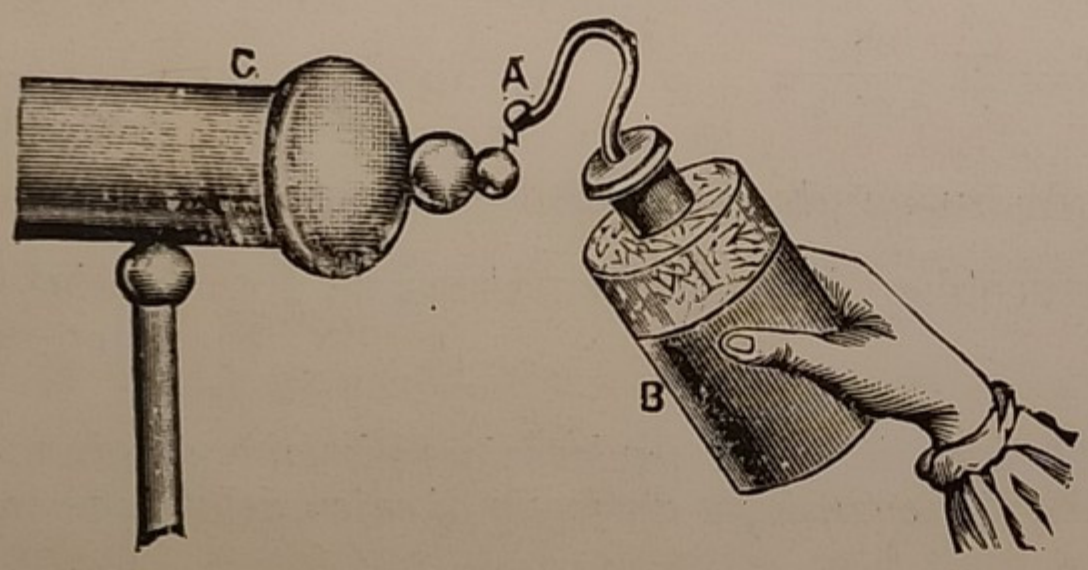


Fig. 294.

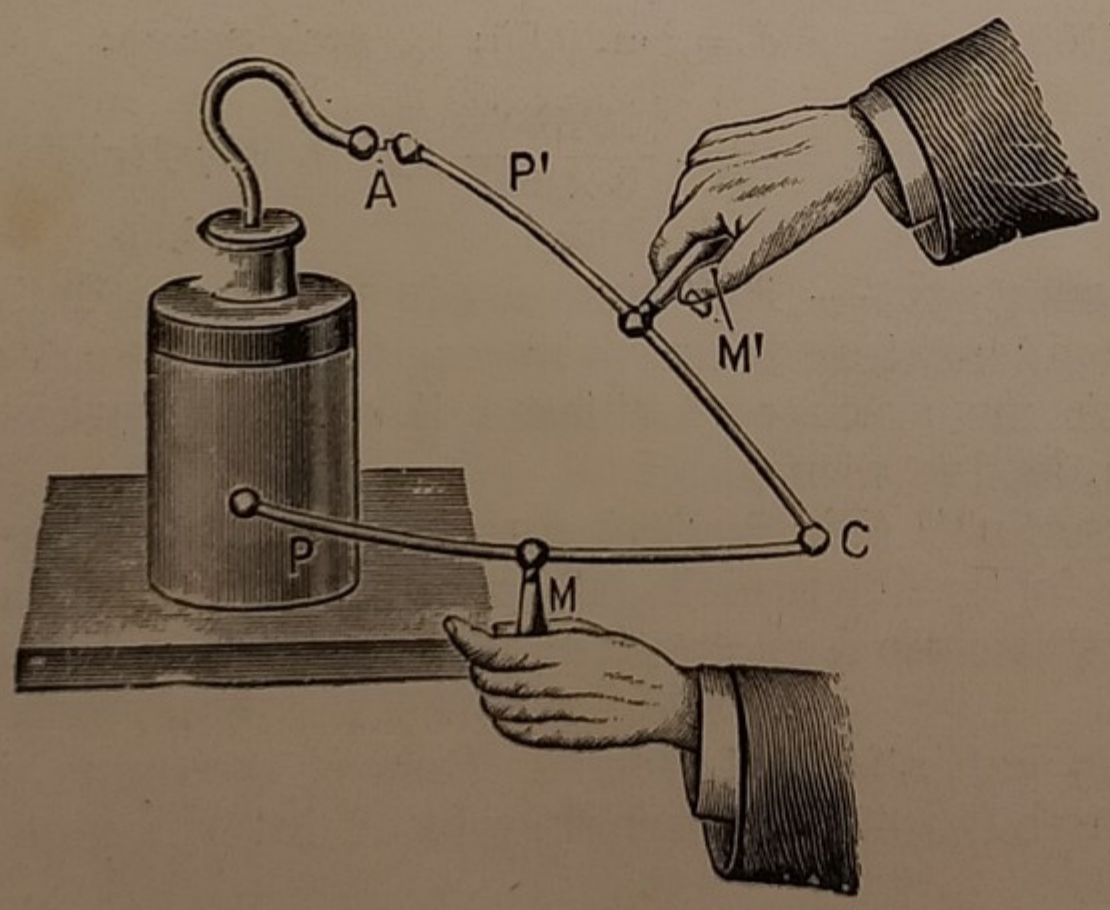


Fig. 295.

Si scarica una bottiglia di Leyda, mettendo in comunicazione le due armature; ciò non si deve fare con la mano, perchè si riceverebbe una *forte scossa* che potrebbe anche essere pericolosa. Si fa solitamente con l'**eccitatore universale**, che è un arco PP' di metallo, a cerniera in C; le due parti dell'arco sono tenute da due manici isolanti M - M'. La Fig. 295 mostra come si dispone l'esperienza; in A si forma una grossa, rumorosa e bianca

scintilla; o come si dice, una *scarica più nudrita*; il che indica che vi passa una grande quantità d'elettricità.

Allorchè il condensatore deve adoperarsi con differenze di potenziale tra le armature non troppo elevate, è sufficiente che l'isolante interposto tra le armature sia della carta paraffinata o della mica. Così si fa nel rocchetto di Ruhmkorff (§ 325) e negli apparecchi radiotelefonici.

191. **Scariche residue.** — Ottenuta la prima scintilla, il condensatore non si scarica completamente; ma se ne possono trarre successivamente altre, sempre più piccole, che si chiamano **le scariche residue.**

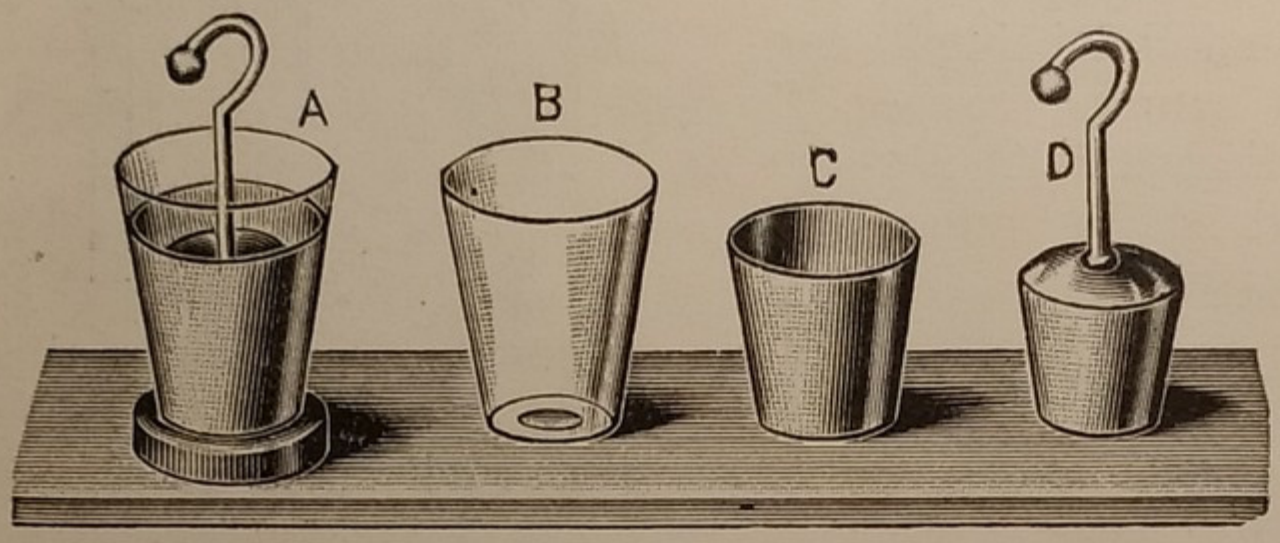


Fig. 296.

Con la prima scintilla si scarica certamente tutta l'elettricità che risiedeva sulle armature; se si ottengono successivamente altre scariche, dobbiamo pensare che esse dipendano da elettricità penetrata nel coibente, da cui poi ritorna a poco a poco sulle armature. Che così avvenga, si dimostra con **la bottiglia scomponibile.**

È questa un condensatore le cui armature sono rigide, in modo da potersi staccare dal coibente. La Fig. 296 mostra la bottiglia composta in *A*, e separatamente le parti che la compongono: il coibente *B*, l'armatura esterna *C* e la interna *D*. Si carica questo condensatore come uno ordinario; poi si toglie, per mezzo di una bacchetta isolante, l'armatura interna, che si scarica toccandola con la mano; si toglie e si scarica anche l'armatura esterna; si ricompone nuovamente la bottiglia, e se ne trae ancora una grossa scintilla. Questa evidentemente non può dipendere, che da elettricità rimasta nel coibente.

A differenza dei conduttori, l'elettricità nei coibenti non risiede solo alla superficie; ma penetra nell'interno.

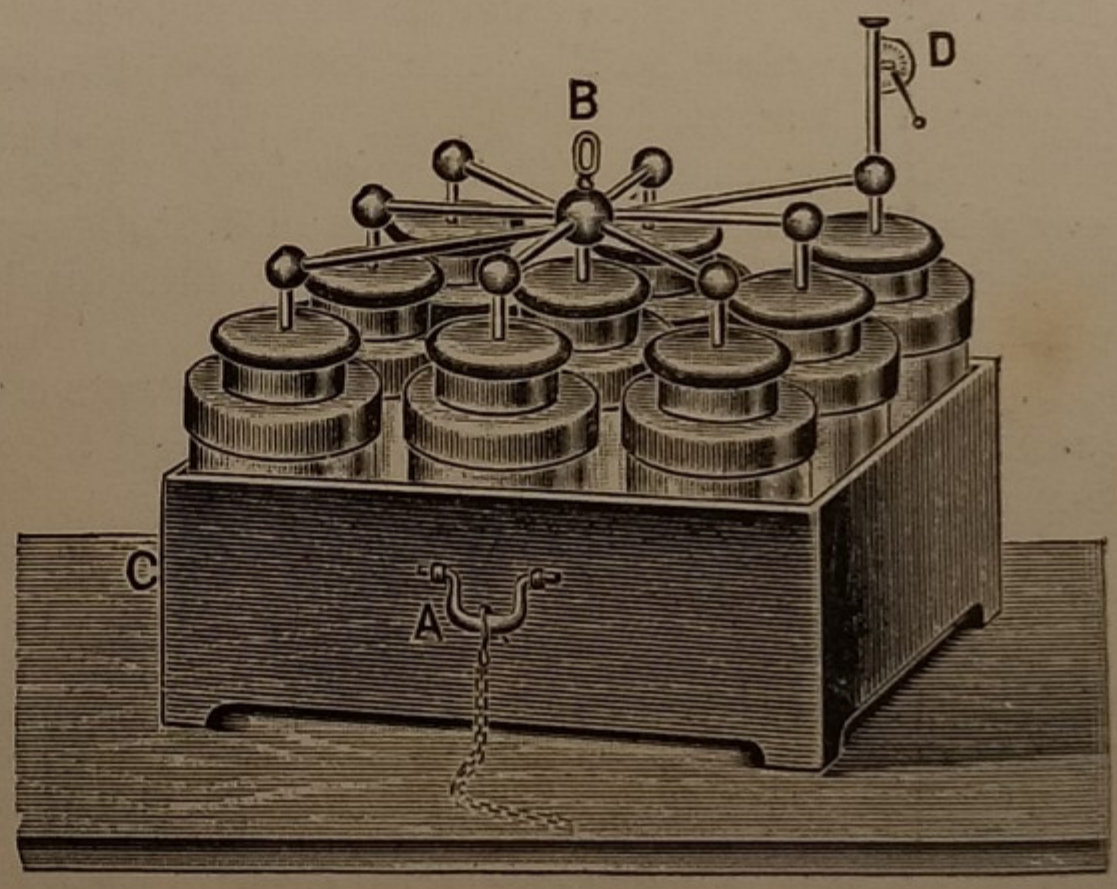


Fig. 297.

192. **Riunione di più condensatori.** — Più condensatori si possono riunire tra loro in due modi:

1. **In superficie o batteria.** Si mettono in comunicazione fra di loro tutte le armature esterne da una parte e tutte le armature interne dall'altra, (Fig. 297). Il sistema equivale ad un condensatore unico, avente per

superficie delle armature la somma delle superfici delle armature delle singole bottiglie. Quindi la capacità aumenta; ma il potenziale rimane quello di una bottiglia sola.

2. **In serie o cascata.** Si mette in comunicazione l'armatura esterna di ogni bottiglia, con l'interna della successiva, (Fig. 298); rimangono libere la prima armatura interna, che si pone in comunicazione con la sorgente di elettricità e l'ultima armatura esterna, che si pone in comunicazione col suolo. In questo modo si sommano i potenziali dei singoli condensatori; ma la carica rimane eguale. Se quindi a pari quantità di elettricità il potenziale è cresciuto, vuol dire che la capacità è diminuita nello stesso rapporto.

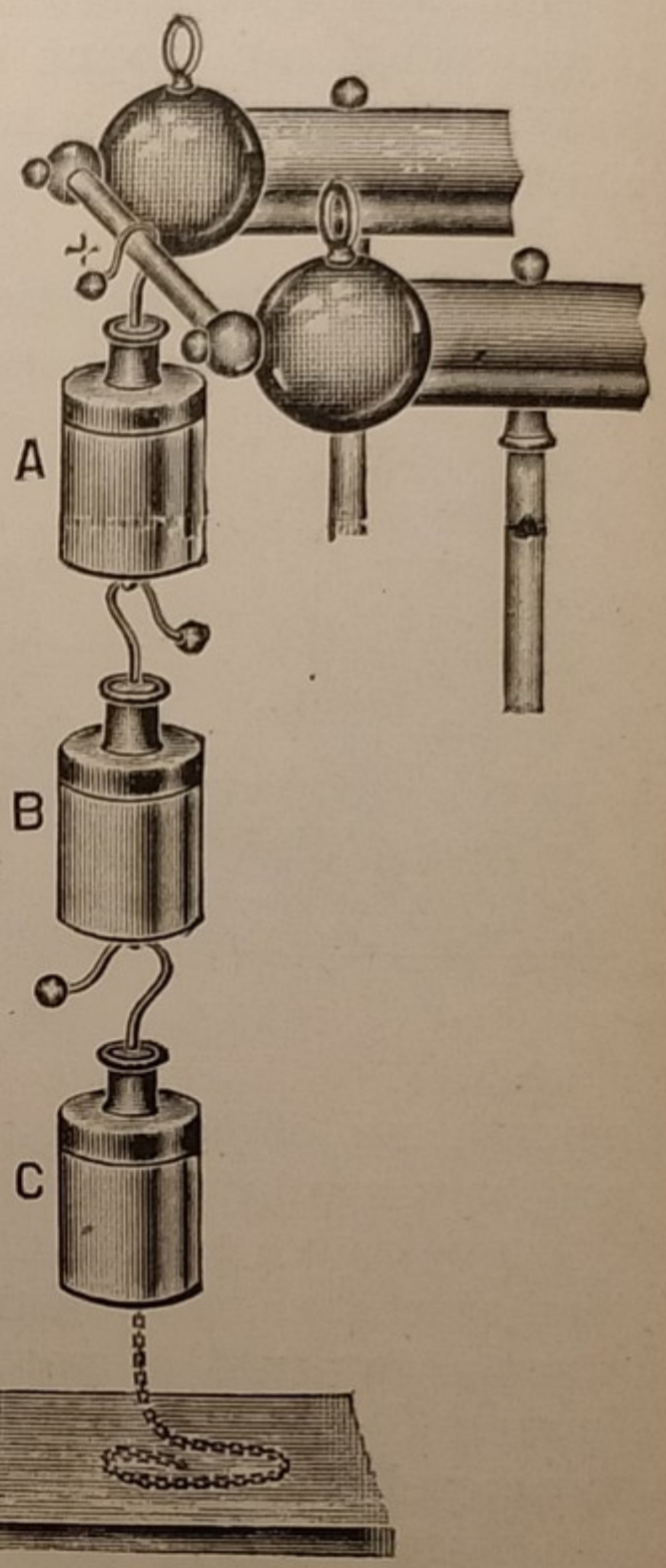


Fig. 298.

Problemi da risolvere.

1. Qual'è la capacità di un conduttore, che assume il potenziale di 100 volt, con una carica di 0,00005 coulomb?

2. Quale dev'essere la capacità di un conduttore isolato, perchè con la carica di 28×10^{-6} *coul.* assuma il potenziale di 7000 *V*?

3. Quale dev'essere il raggio di un conduttore sferico isolato, perchè con la carica di 0,07 *coul.* assuma il potenziale di 3500 *V*?

4. La capacità di un condensatore, il cui isolante è di vetro, di mm. 2 di spessore, è di 0,05 *microfarad*. Quale sarebbe la capacità di un condensatore di egual superficie, se l'isolante fosse ebanite, dello spessore di mm. 0,5?

5. Calcolare la capacità in *microfarad* di una bottiglia di Leyda cilindrica, il cui vetro ha lo spessore uniforme di mm. 2, il diametro della superficie cilindrica interna è di cm. 12, e la stagnola ricopre il fondo totalmente e le pareti sino all'altezza di cm. 25.

6. Quanta elettricità occorre somministrare ad una batteria di 5 bottiglie di Leyda, le cui armature sono ciascuna di 3 dm^2, ed il coibente è vetro di mm. 3 di spessore, per caricarla al potenziale di 6000 *V*?

Macchine elettrostatiche.

193. **Varie specie di macchine elettrostatiche.** — Le **macchine elettrostatiche** servono a produrre elettricità ad alto potenziale, come quella studiata fin'ora. Esse si dividono in due categorie: *macchine a strofinio* e *macchine ad influenza*.

Le macchine a strofinìo furono le prime adoperate. Una delle più antiche era costituita semplicemente da una palla di zolfo, che si faceva ruotare

su di un perno (Fig. 299), e che si strofinava direttamente con le mani; l'elettricità che si sviluppava, si raccoglieva con una catenella di metallo che poggiava sulla palla.

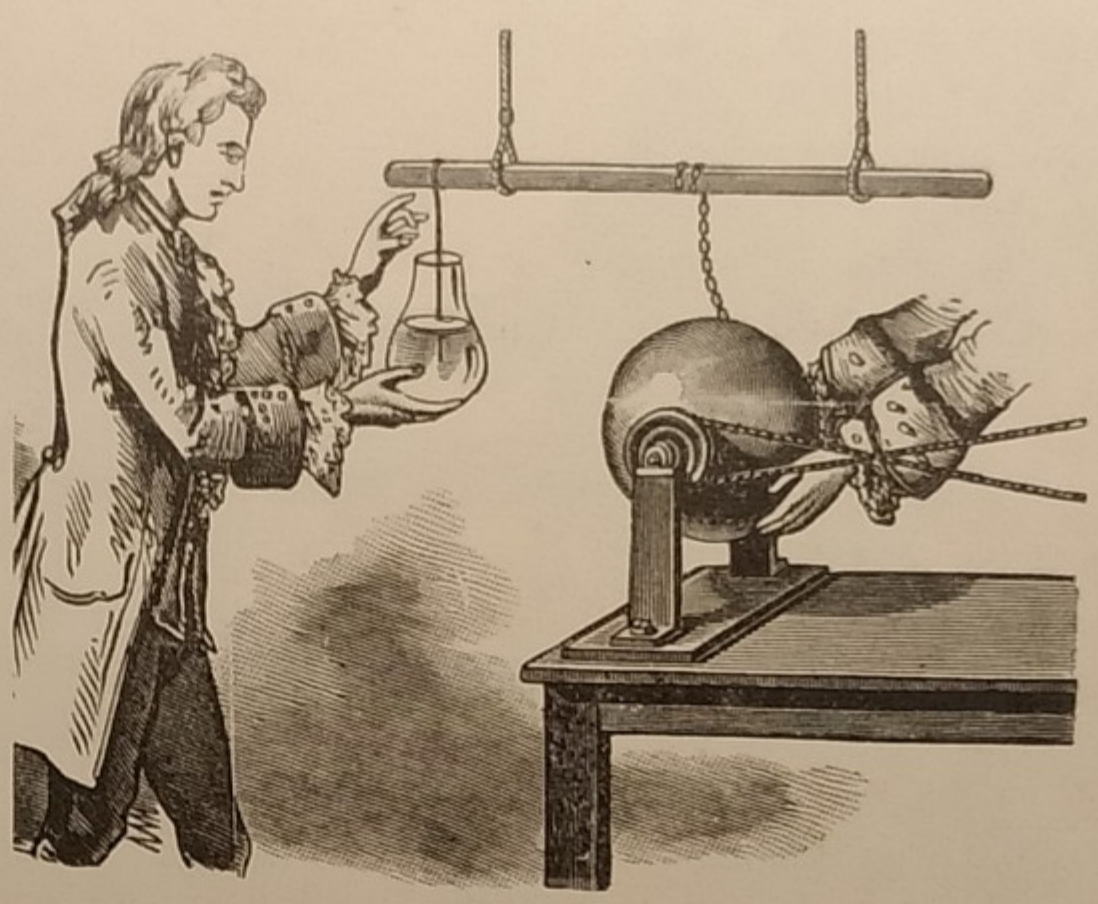


Fig. 299.

194. **Macchine a strofinìo - Macchina di Ramsden.** — Fra le macchine a strofinìo la più comune è oggi la **macchina di Ramsden,** rappresentata schematicamente nella Fig. 300, e in prospettiva nella Fig. 301.

Essa è formata da un grande disco di vetro AB, che può ruotare attorno ad un asse orizzontale, per mezzo di una manovella M.

Ruotando passa fra due coppie di **cuscinetti** C e C', formati da tavolette imbottite di cuoio, spalmato di *oro mussivo* (bisolfuro di stagno); essi comunicano con la terra, per mezzo di una catenella di metallo T. Alle estremità del diametro orizzontale vi sono due bacchette di ottone P e P', ricurve ad U, munite di numerose punte; per la loro forma sono chiamate i **pettini** ed abbracciano il disco senza toccarlo. Essi comunicano ciascuno con un conduttore cilindrico NN', sostenuto da colonnette DD' isolanti di vetro, che si chiama il **collettore** della macchina; i due collettori all'altra estremità sono messi in comunicazione per mezzo di un'asticella di metallo S.

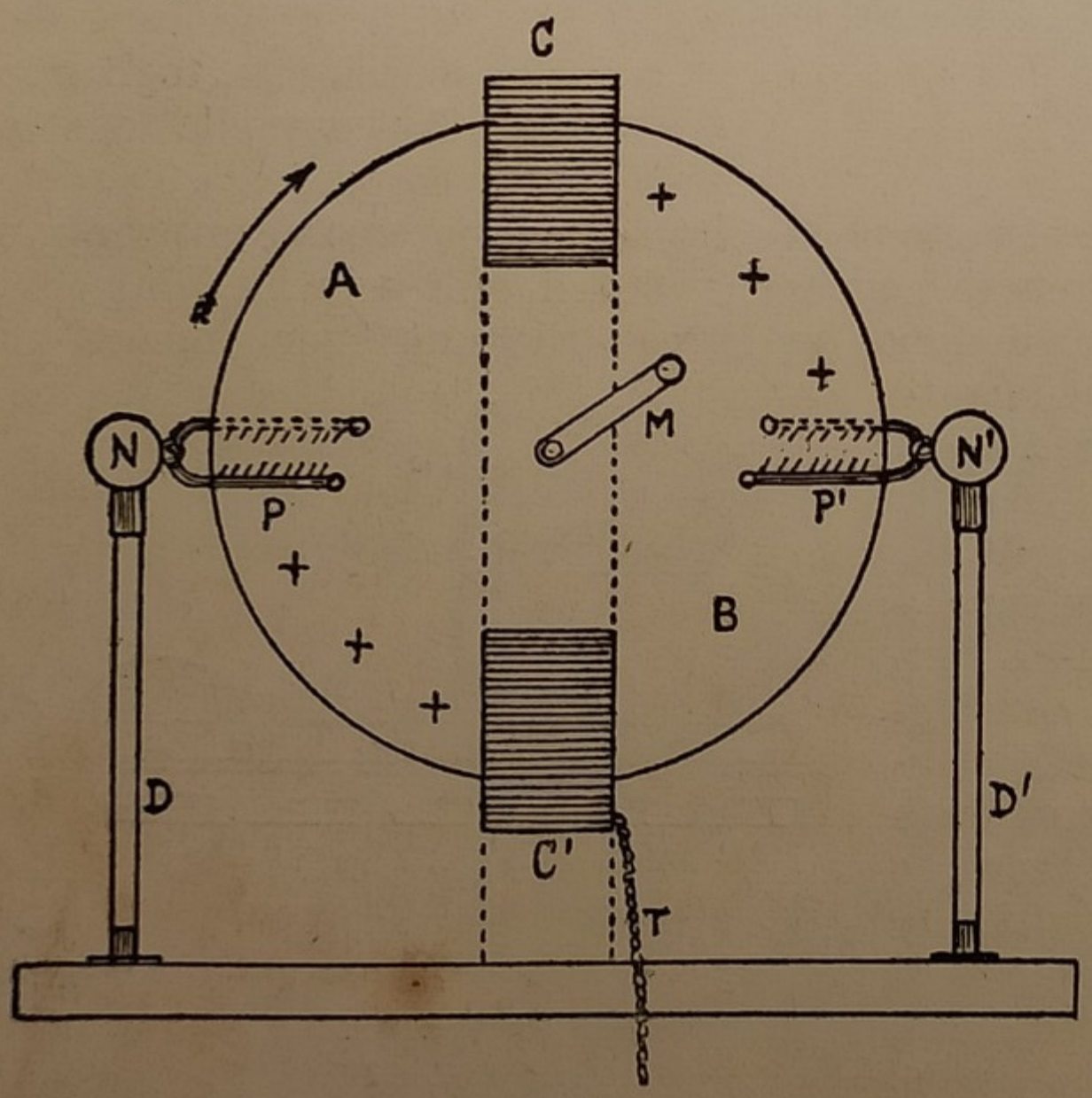


Fig. 300.

Facciamo girare il disco in un senso qualsiasi, p. es., come è indicato dalla freccia. Consideriamo un punto A del disco; esso passa fra i cuscinetti C e si elettrizza positivamente; mentre i cuscinetti si elettrizzano negativamente. L'elettricità dei cuscinetti, per la catenella, si disperde al suolo. La parte A del disco elettrizzata positivamente, continuando la rotazione si porta fra le branche del pettine P'; non essendovi contatto, il pettine ed il collettore N' si elettrizzano per influenza: nella parte più

vicina, cioè sul pettine, di elettricità di segno contrario, ossia negativa; nella parte più lontana, cioè all'estremità di N', dello stesso segno, ossia positiva. Questa è l'elettricità che utilizziamo; l'elettricità negativa del pettine, per il potere delle punte (§ 174) sfugge, va sul disco e neutralizza l'elettricità positiva di esso. Il disco passa perciò in B diselettrizzato; torna ad elettrizzarsi strofinando fra i cuscinetti C' ed induce nuova elettricità positiva su N; e così di seguito finchè il disco ruota.

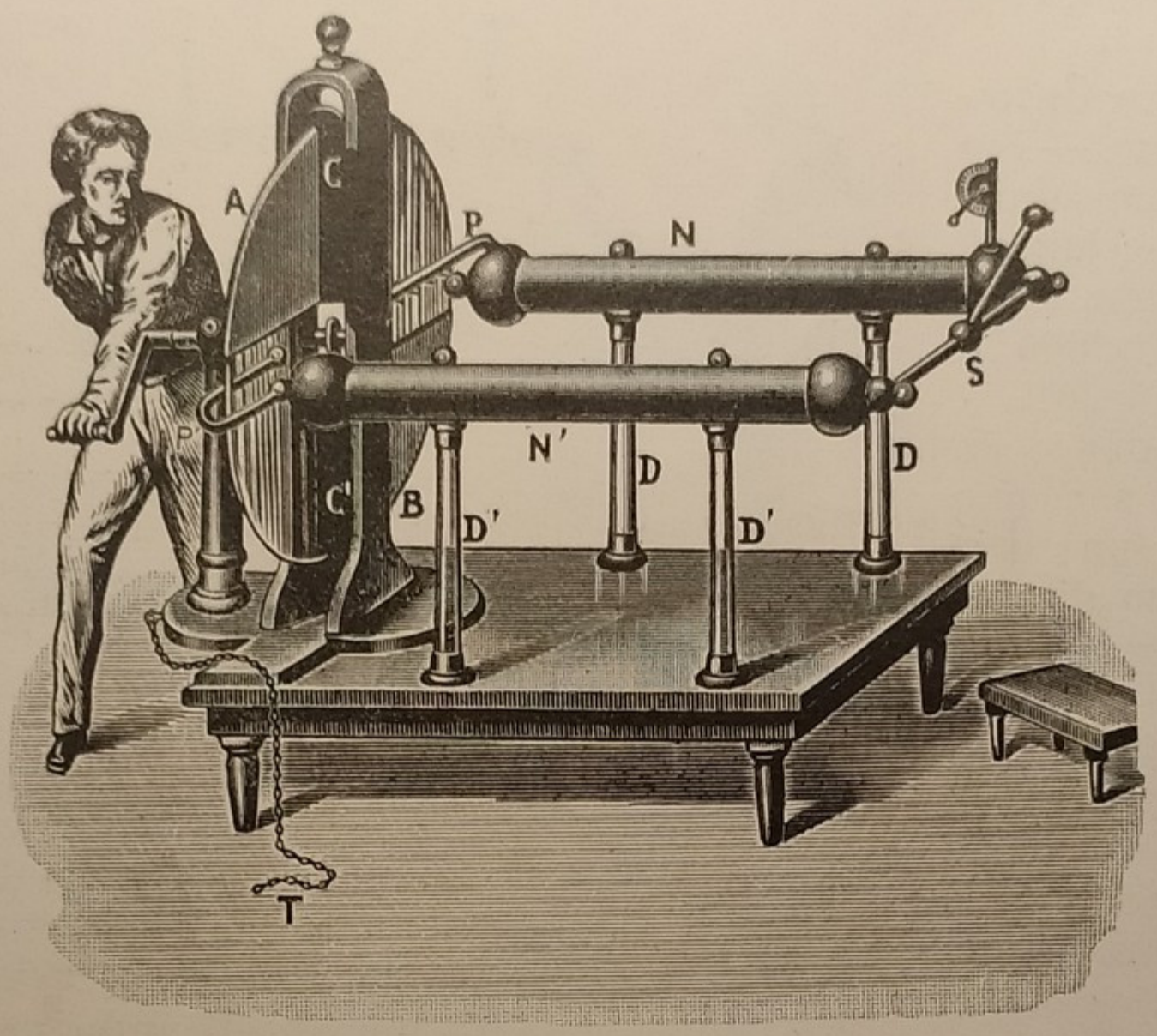


Fig. 301.

Si può, volendo, raccogliere l'elettricità negativa dei cuscinetti, togliendo la catenella che la disperde.

Le macchine a strofinìo forniscono poca elettricità, a potenziale non troppo elevato; si possono cioè ottenere con esse rade ed esili scintille, di pochi centimetri di lunghezza; richiedono un lavoro rilevante per vincere gli attriti dei cuscinetti e difficilmente funzionano con tempo umido. Oggi non sono più adoperate.

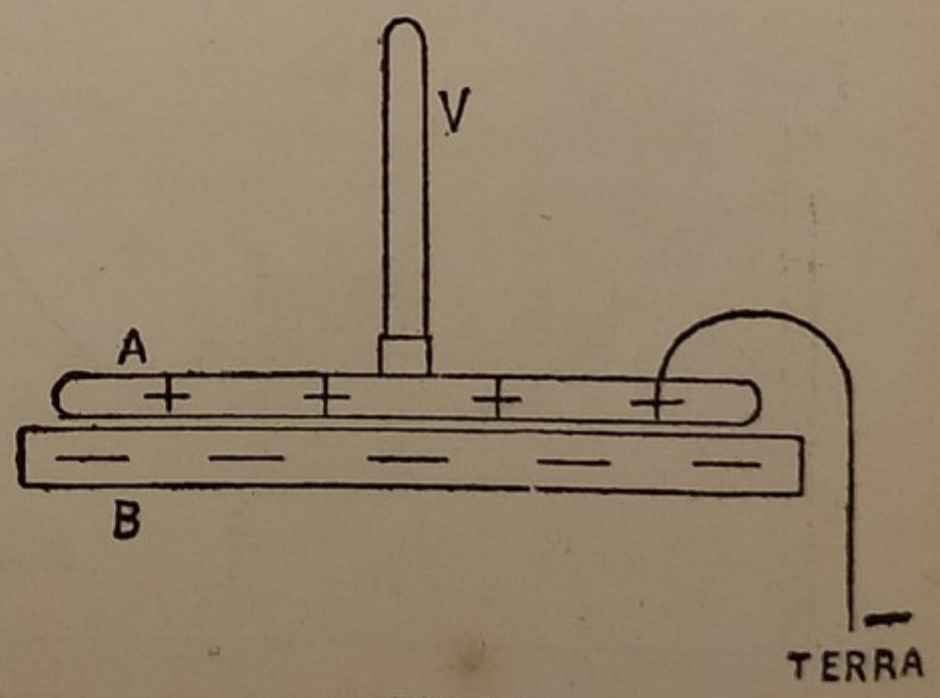


Fig. 302.

195. **Macchine ad influenza - L'elettroforo di Volta.** — L'elettroforo del Volta [1] si può considerare come la più semplice delle macchine ad influenza; è rappresentato nella Fig. 302 schematicamente, e nelle Figg. 303-304 in prospettiva.

È formato di un grosso disco B di sostanze resinose: miscuglio di cera, pece greca, ceralacca, ecc., o anche un semplice disco di ebanite; si chiama la **schiacciata.** Su di esso si pone un altro disco A conduttore, cioè di metallo o di legno rivestito di stagnola; è tenuto da un manico isolante V, e per la sua forma si chiama lo **scudo.**

(1) A. Volta, vedasi nota al § 234. L'elettroforo è del 1775.

Per far funzionare l'apparecchio, si batte dapprima la schiacciata con una pelle di gatto; con ciò, essendo una resina, si elettrizza negativamente. Vi si poggia sopra lo scudo, e se ne tocca col dito la parte superiore, per metterlo in comunicazione con la terra, (Fig. 303). Per la scabrosità dei due dischi, questi non si toccano che in un numero limitatissimo di punti; l'elettricità della schiacciata che risiede in questi punti (e non quella dei punti più lontani, per essere la schiacciata di sostanza isolante) si trasmette al disco *A* per contatto; ma è così poca che la trascuriamo. Invece in tutti gli altri punti, non essendovi contatto, l'elettricità si trasmette al conduttore scudo – corpo umano – terra, per influenza; cioè lo scudo, ch'è la parte più vicina, si elettrizza positivamente, e la terra, ch'è la parte più lontana, negativamente, (Fig. 302). Togliendo, dopo qualche secondo, il dito e sollevando lo scudo, lo si trova perciò elettrizzato *positivamente*, e se ne può trarre una piccola scintilla, (Fig. 304). L'operazione si può ripetere quante volte si vuole, senza più bisogno di battere la schiacciata.

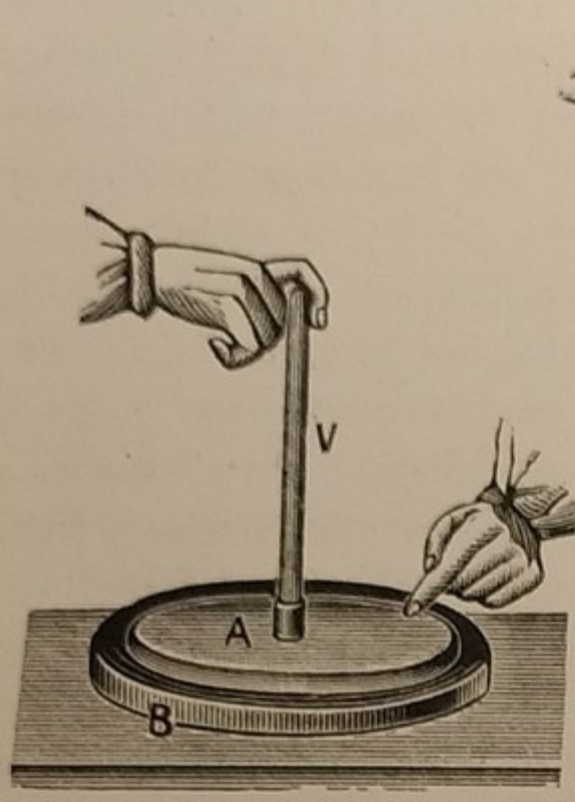


Fig. 303.

Fig. 304.

L'elettroforo non è adatto a fornire rilevanti quantità di elettricità; quindi è pochissimo adoperato.

196. **Macchina di Wimshurst.** — Di macchine ad influenza ve ne sono di parecchi tipi; noi ci limitiamo a descrivere quella di Wimshurst, che è la più adoperata.

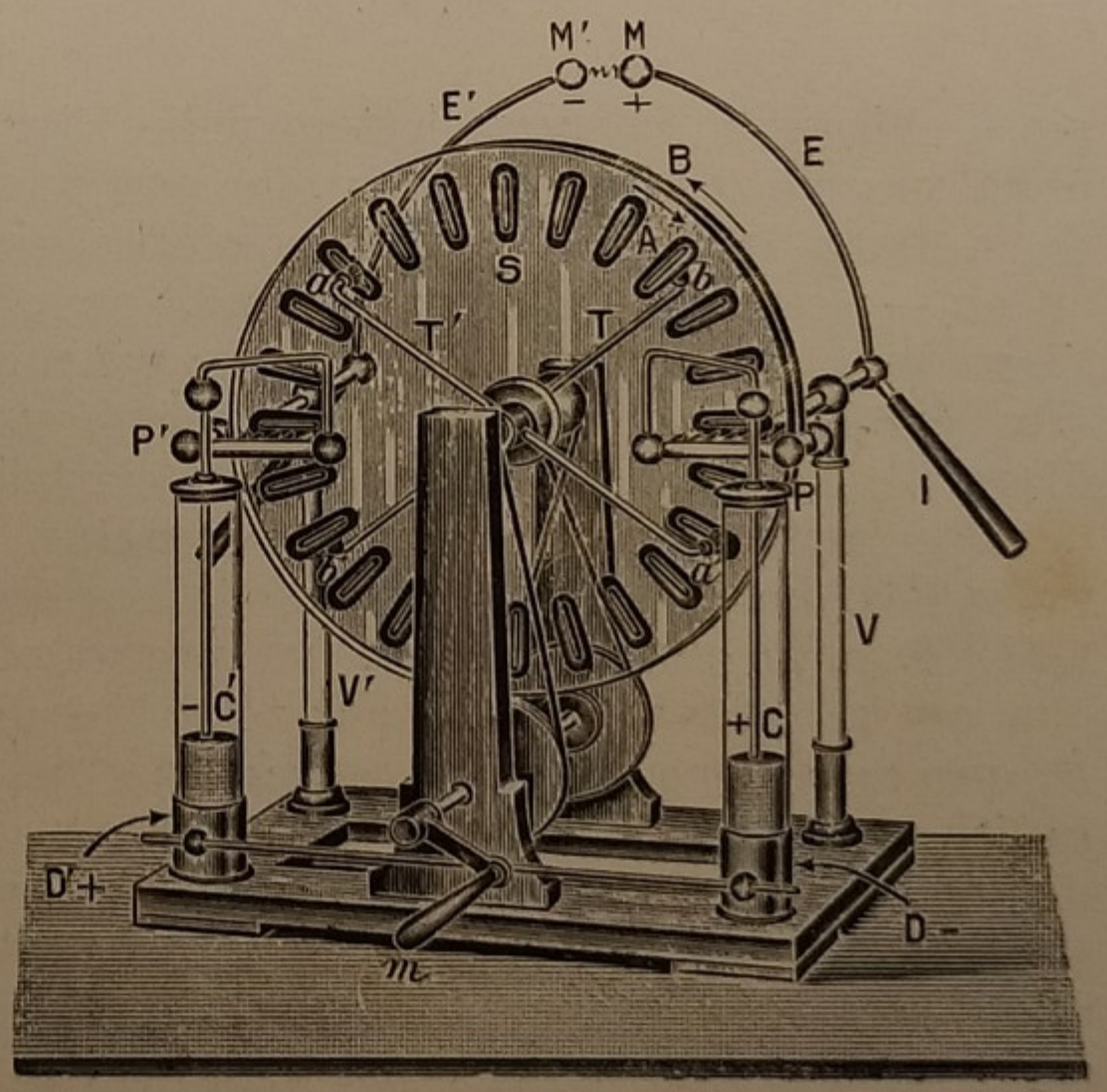


Fig. 305.

Essa consta di due dischi eguali *A* e *B* (Fig. 305), di vetro o di ebanite, disposti uno accanto all'altro parallelamente; possono ruotare sullo stesso asse, in senso contrario. Su ciascuno di questi dischi, solo nelle facce esterne, sono incollate delle linguette *S* di stagnola o di altro metallo, chiamate le **armature**, di dimensioni e numero a piacere, disposte radialmente. Su queste armature strisciano dei fiocchetti di metallo

a e b, posti alle estremità di due bacchette di metallo T e T', una per ciascun disco, inclinate fra loro ad angolo retto e a 45° con la verticale; si chiamano i **conduttori diametrali.** Alle estremità del diametro orizzontale sono posti due pettini P e P', che abbracciano entrambi i dischi e comunicano ciascuno con una bacchetta di metallo E ed E', sostenute da colonnette V–V' isolanti. Queste bacchette terminano ad un'estremità con una sferetta M–M', ed all'altra con un manico isolante I; si chiamano i **poli** od **elettrodi** della macchina. Le due sferette possono avvicinarsi od allontanarsi a piacere; durante il funzionamento della macchina si caricano l'una di elettricità positiva e l'altra negativa e fra di esse scoccano le scintille.

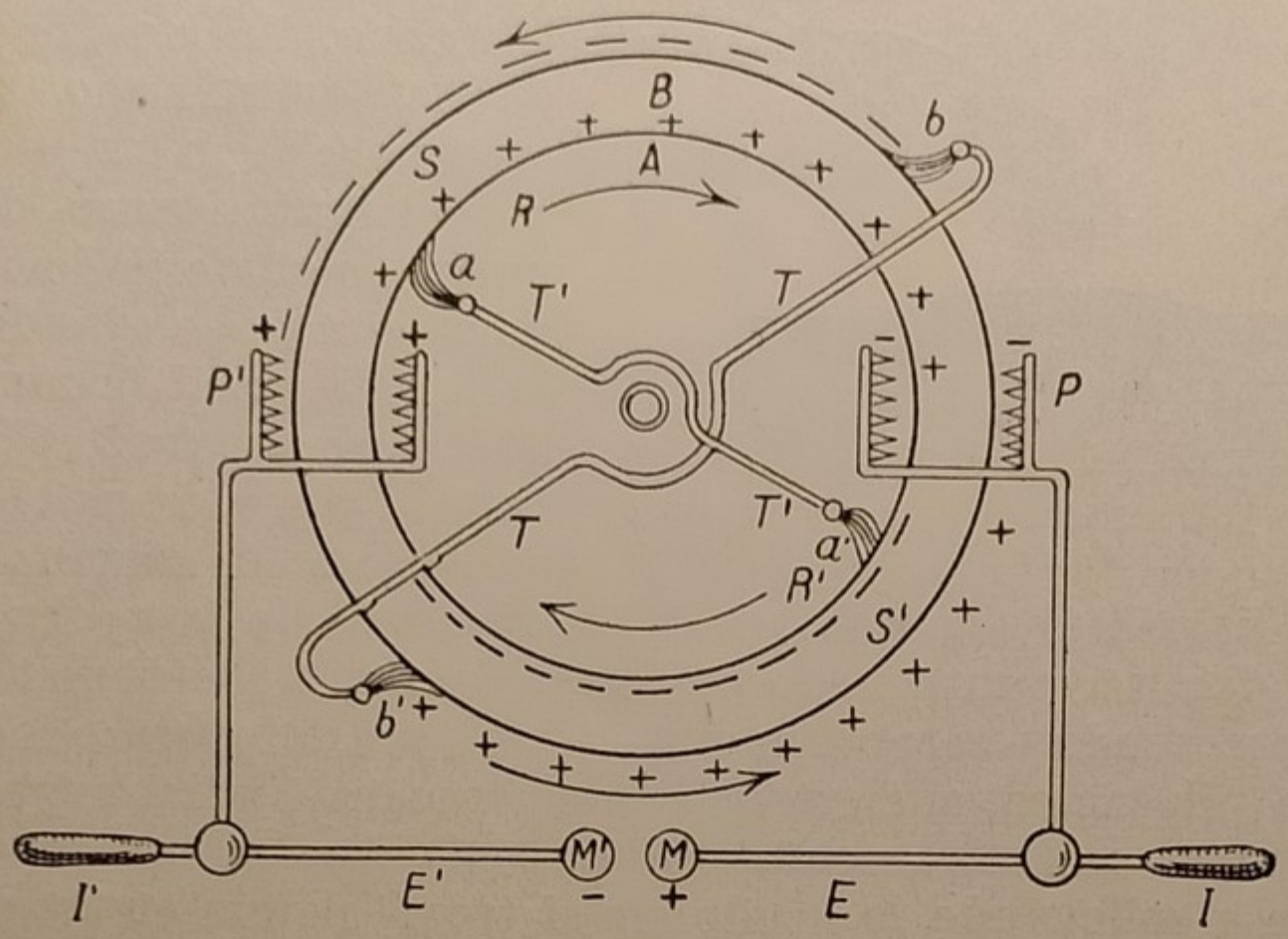


Fig. 306.

Per spiegare il funzionamento della macchina, rappresentiamola schematicamente nella Fig. 306; nella quale abbiamo indicati i due dischi con diametro diverso, per maggiore chiarezza; la stessa lettera nelle Figg. 305-306 indica lo stesso organo della macchina. Supponiamo che per una causa qualsiasi un settore (S) di un disco (B) abbia le armature elettrizzate (anche debolmente), ad es. di segno —; esse per influenza, allorchè sono arrivate di faccia al conduttore diametrale T', inducono su questo: nel punto più vicino a elettricità positiva, che per il contatto del fiocchetto si distribuisce sulle armature R del disco A; e nel punto più lontano a' elettricità negativa, che per il contatto del fiocchetto si distribuisce sulle armature R' del medesimo disco A. A loro volta le armature R allorchè sono arrivate di faccia al conduttore diametrale T, inducono su questo: nel punto più vicino b elettricità negativa, che per il contatto del fiocchetto si distribuisce sulle armature S del disco B, *aumentandone la carica primitiva*; e nel punto più lontano b' elettricità positiva, che per il contatto del fiocchetto si distribuisce sulle armature S' del medesimo disco B. Aumentando la carica delle armature S aumenta anche l'influenza su T' e quindi anche la carica sulle armature R ed R'; e allora aumenta anche l'influenza di R su T e perciò ancora più la carica delle armature $S - S'$; e così via, i settori dei due dischi si caricheranno sempre più fortemente, coi segni indicati sullo schema.

Ruotando i dischi nel senso delle frecce, le armature S ed R', elettrizzate concordemente di segno —, arrivano tra le punte del pettine P', e per influenza inducono elettricità dello stesso segno — all'estremo lontano M' del conduttore $P'E'M'$; ed elettricità di segno contrario + sul pettine vicino P'. Quest'elettricità, per il potere delle punte, sfugge da

queste sui dischi e neutralizza la carica primitiva delle armature di essi, che oltre il pettine passano diselettrizzate; onde possono elettrizzarsi nuovamente per influenza oltre i fiocchetti ab', col segno indicato nello schema.

Nello stesso modo le armature S' ed R, arrivate tra le punte del pettine P, inducono in M elettricità + e passano oltre il pettine diselettrizzate, per tornare ad elettrizzarsi oltre i fiocchetti $a'b$, col segno indicato nello schema.

In tal modo si produce la elettrizzazione dei poli M ed M' della macchina.

Dalla spiegazione precedente si deduce che per il funzionamento della macchina si richiede una piccola carica iniziale, che questa macchina genera da sè, forse per lo strofinìo dei fiocchetti contro i dischi; essa perciò si chiama **autoeccitatrice**; tale carica, come si è spiegato, viene poi continuamente moltiplicata con la rotazione dei dischi.

Due condensatori C e C' (Fig. 305), le cui armature interne comunicano ciascuna con un elettrodo della macchina e le esterne fra di loro, rendono le scariche più rade, ma più nudrite.

Questa macchina fornisce molta elettricità, ad alto potenziale; il potenziale cresce col diametro dei dischi, e con la velocità di rotazione di essi. La scintilla ottenuta può raggiungere una lunghezza fino ad un terzo del diametro dei dischi. La macchina funziona con poca forza e con qualunque tempo; perciò è preferibile a quella a strofinìo.

Effetti della scarica elettrica.

197. **Effetti luminosi.** — Gli effetti della scarica possono essere: *luminosi*, *calorifici*, *meccanici*, *chimici*, *fisiologici*.

Gli effetti luminosi sono quelli che presenta la scarica, per la luce da essa emanata, nell'aria e nei gas rarefatti. Essi sono assai importanti, e li studieremo più particolarmente nel Capitolo successivo.

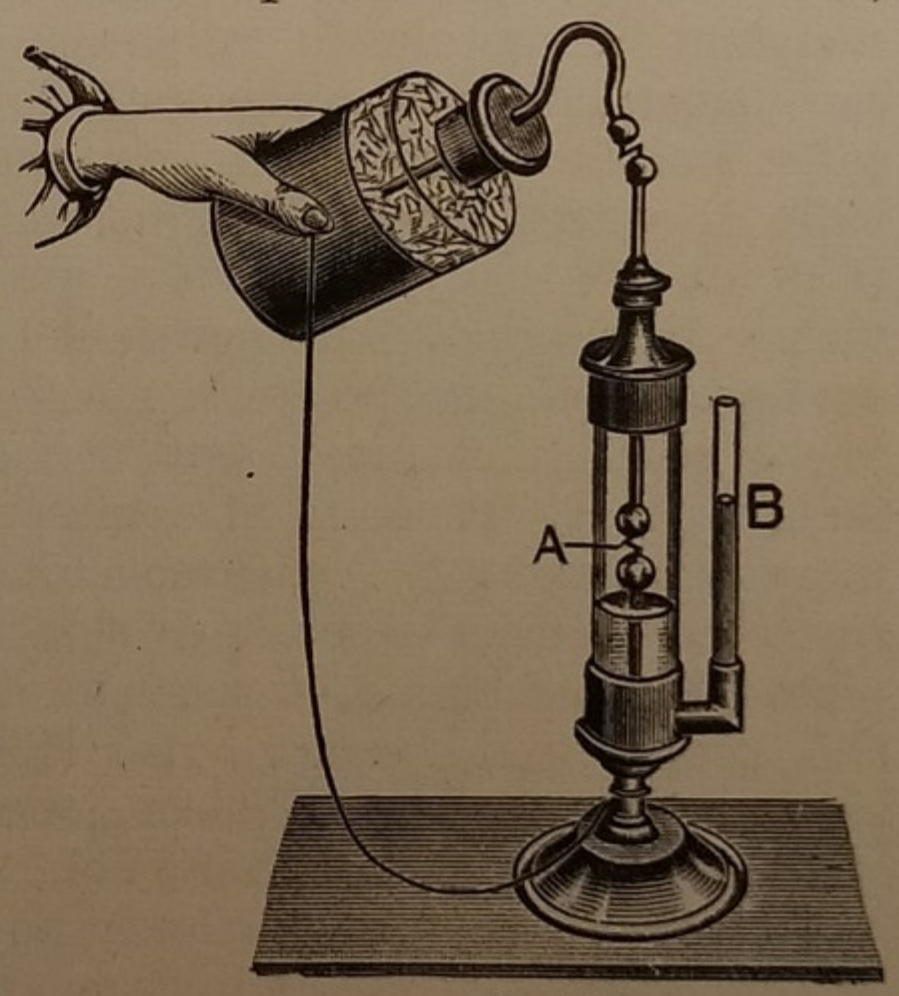


Fig. 307.

198. **Effetti calorifici.** — La scarica è accompagnata da produzione di calore. Facendo avvenire delle scintille in A (Fig. 307) dentro un recipiente chiuso, comunicante con un cannello B, contenente in basso del liquido, si vedrà questo salire in B, per la dilatazione subìta col riscaldamento dall'aria di A.

Facendo passare la scarica di una batteria per un sottile filo di metallo ab (Fig. 308), teso fra le estremità delle bacchette di uno **spinterometro,** il filo fonde e perfino volatilizza.

Si faccia uscire del gas da un becco Bunsen, e poi si faccia scoccare una scintilla all'estremità del becco: il gas si accenderà. Analogamente con la scintilla si può infiammare dell'etere o della polvere pirica (Fig. 309), ecc.

Si è applicato questo effetto in alcuni accenditori per gas illuminante, per l'esplosione delle mine a distanza, ecc.

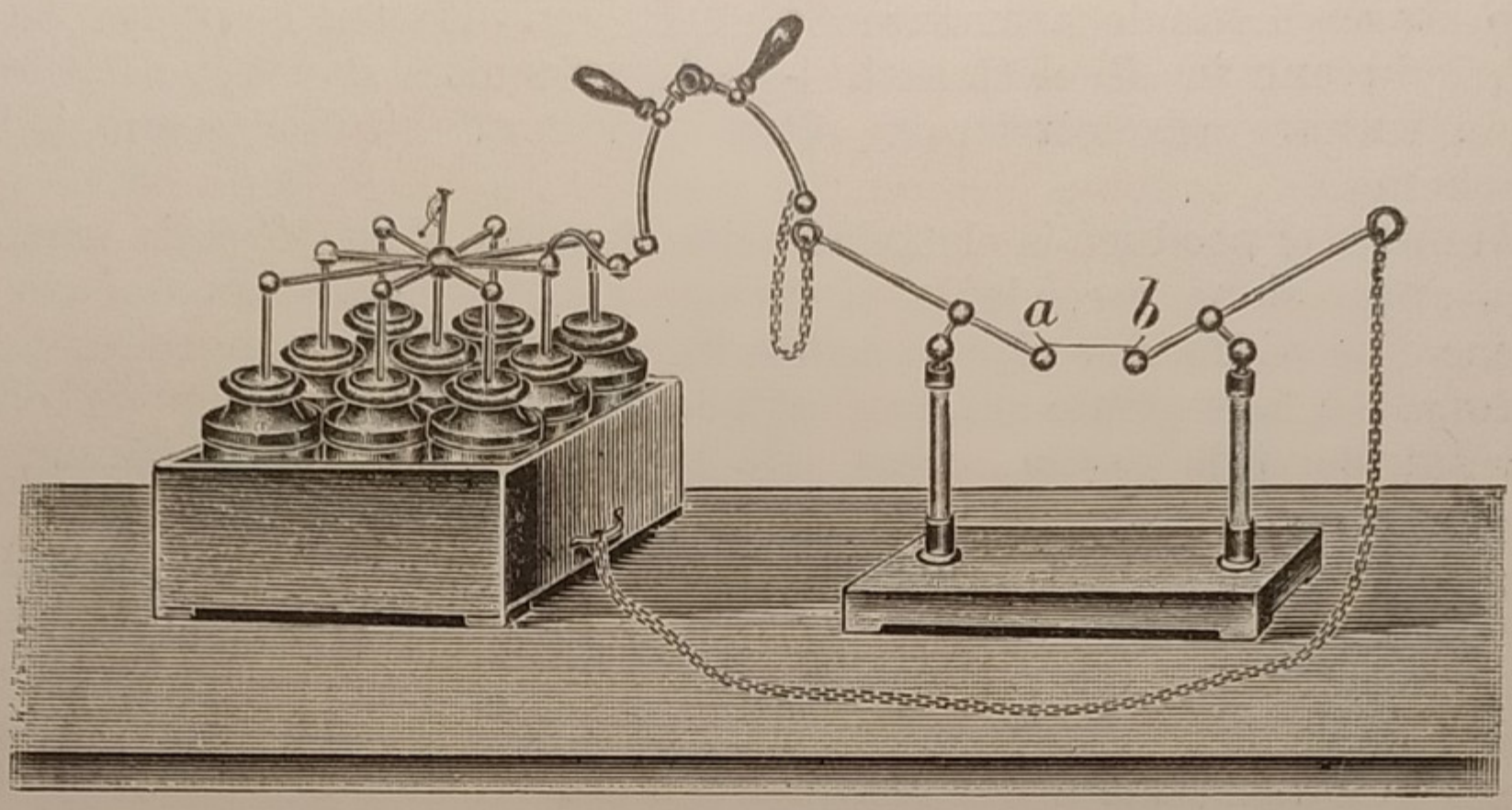


Fig. 308.

199. **Effetti chimici.** — Come è noto dalla *Chimica*, con la scarica elettrica si ottiene la combinazione dell'idrogeno con l'ossigeno, per formare l'acqua.

Si può ripetere più comodamente l'esperienza, con la **pistola di Volta.** È questa un recipiente di metallo, la cui parete è attraversata lateralmente da una asticella *A* di metallo, isolata dal recipiente per mezzo di un tubo di vetro, (Fig. 310). L'estremità interna *O* di questa asticella arriva a qualche millimetro di distanza dalla parete del recipiente, senza toccarla. In questo si mette un miscuglio di gas illuminante e aria, e si chiude con un tappo *B*. Tenendo il recipiente con la mano, si accosta *A* ad una macchina elettrica; fra *O* e la parete scocca una scintilla, che fa esplodere il miscuglio; si sente un colpo forte, e il tappo vien lanciato via, (Fig. 311). In pari modo si provoca l'accensione della miscela nei motori a scoppio (Vol. 1° - § 332).

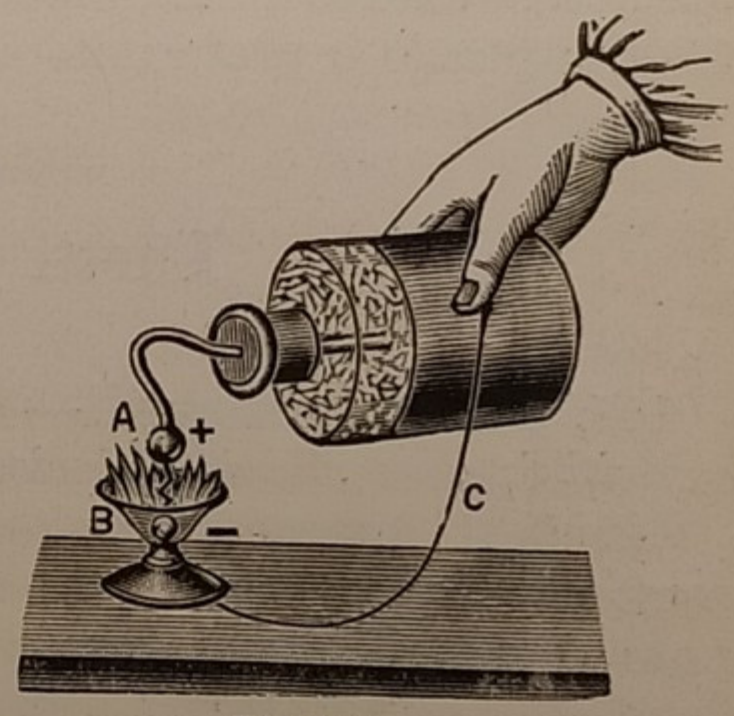


Fig. 309.

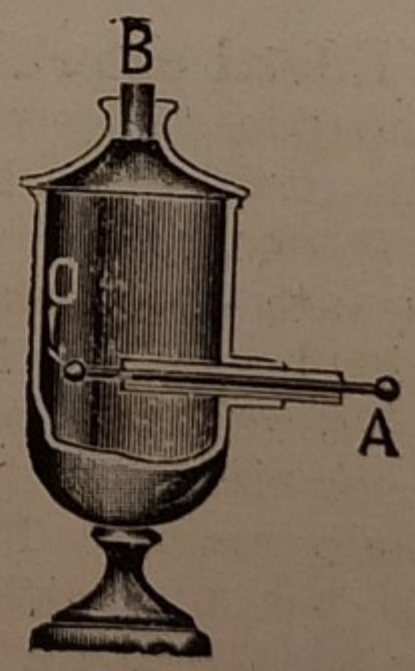


Fig. 310.

Gli effluvi elettrici trasformano l'ossigeno (O_2) in *ozono* (O_3); dipende da ciò quell'odore caratteristico tra aglio e zolfo, che ha l'aria dopo la caduta di un fulmine, o in vicinanza di una macchina elettrostatica in funzione. L'ozono oggi si adopera per la sterilizzazione delle acque, per l'invecchiamento artificiale dei vini, per la depurazione dell'aria viziata in ambienti

chiusi, ecc.; vi sono in commercio opportuni ozonizzatori per produrlo con le scariche elettriche.

Di recente si sono applicate le scariche elettriche anche per l'ossidazione dell'azoto e quindi per la fabbricazione dell'acido nitrico.

Fig. 311.

200. **Effetti meccanici.** — Ponendo un cartoncino tra i poli di una macchina elettrostatica, ogni scintilla lo attraversa, producendo un forellino. Gli orli di questo sono sfrangiati e rilevati da ambo le facce del cartoncino; il che dice che non è passato da una faccia all'altra *qualche cosa* in un senso solo, come farebbe uno spillo; ma che il foro è prodotto da forze elettriche che agiscono egualmente e contemporaneamente nei due sensi.

Si può in modo simile forare una lastra di vetro, anche di notevole spessore, purchè la si disponga tra due bacchettine *a* e *b*, le cui punte toccano

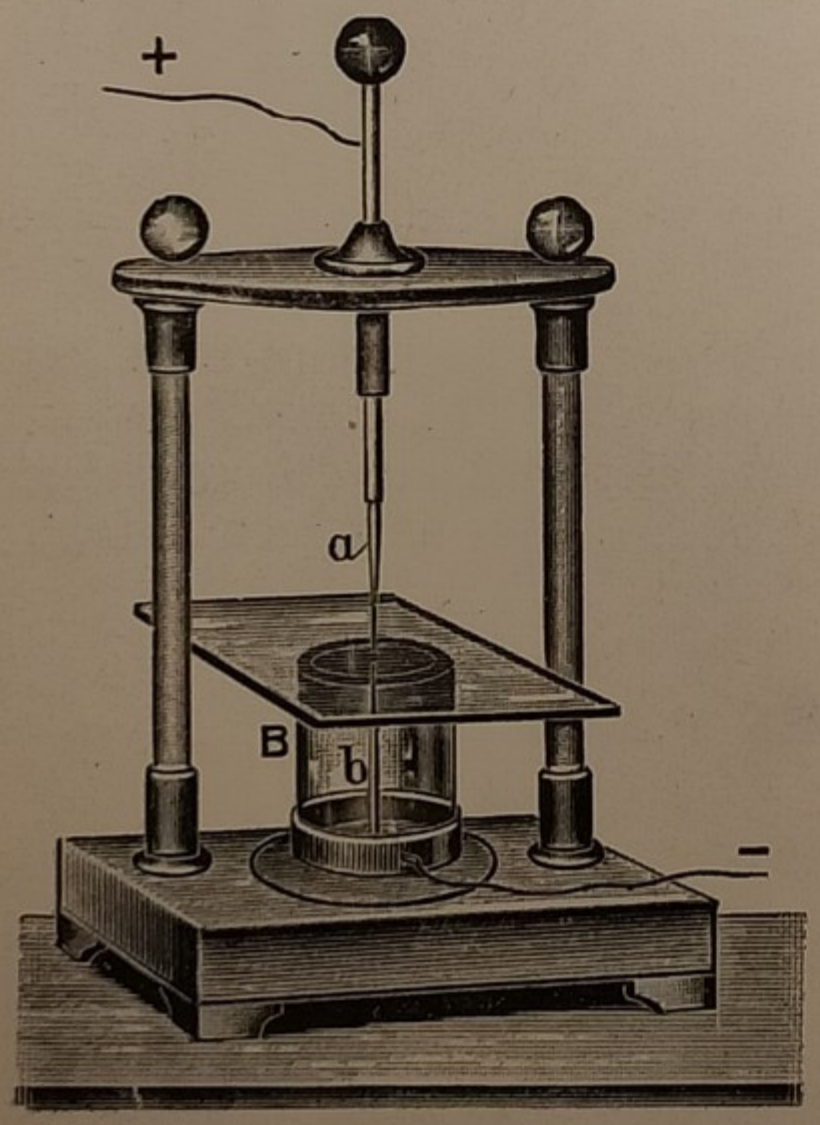


Fig. 312.

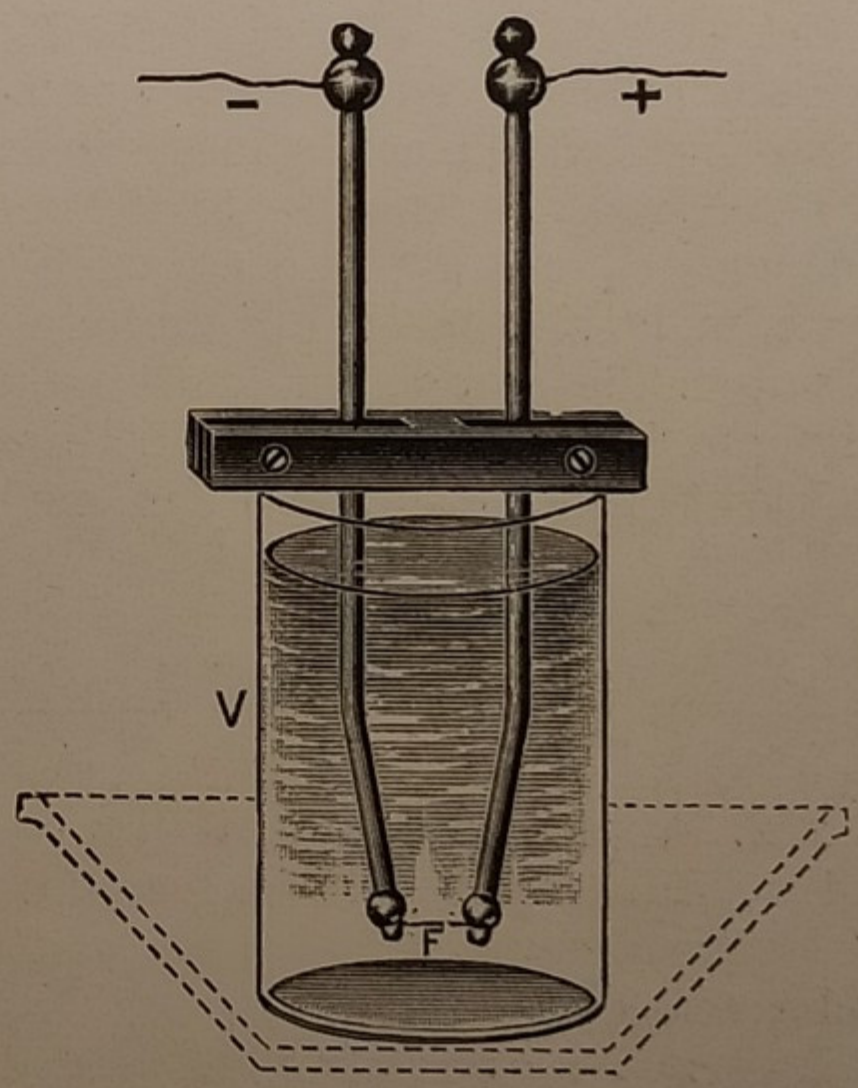


Fig. 313.

il vetro, e si appoggi all'orlo di un bicchiere di vetro *B*, ripieno di olio di vaselina, (Fig. 312). Così si evita che la scarica anzichè attraversare la lastra di vetro ne lambisca la superficie, passando da *a* a *b* dopo aver girato per l'orlo. Mettendo le due bacchette *a* e *b* in comunicazione con le due armature di una batteria di condensatori, si vede scoccare la scintilla attra-

verso il vetro, e questo si trova forato. Quest'apparecchio si chiama il **fora-vetro.**

Se una grossa scarica avviene in F (Fig. 313), nell'interno di un bicchiere V pieno d'acqua, si produce uno scotimento così forte di tutto il liquido, da mandare in pezzi il bicchiere; quest'esperimento va sotto il nome di **torpedine elettrica.**

201. **Effetti fisiologici.** — Si chiamano con questo nome gli effetti della scarica sull'organismo di esseri viventi. La scarica, attraversando il nostro corpo, provoca una contrazione rapida, violenta, dei muscoli, che si chiama la **scossa elettrica.** Questa contrazione può essere così forte da produrre l'arresto del cuore e lesioni interne; cioè può dare la morte. Se non vi sono lesioni interne, si può ristabilire la circolazione del sangue con la **respirazione artificiale,** come si pratica con gli asfittici, ed il fulminato può essere richiamato in vita [1].

Fig. 314.

Negli Stati Uniti d'America si giustiziano i condannati a morte, per mezzo di poderose scariche elettriche; la Fig. 314 mostra la **sedia elettrica** alla quale si legano i condannati per la loro esecuzione.

La contrazione moderata dei muscoli può essere utile a scopo curativo di alcune malattie (paralisi di un arto, ecc.); è per questo adoperata elettricità a potenziale conveniente, ottenuta meglio con altre disposizioni che studieremo in seguito (§ 325). L'applicazione dell'elettricità con le macchine elettrostatiche, è chiamata in medicina col nome di **franklinizzazione.**

Effetti luminosi della scarica.

202. **Aspetti della scintilla.** — La scarica elettrica nell'aria si produce sotto forma di **scintilla;** la luce da essa emanata è dovuta all'incandescenza di particelle staccantisi dagli elettrodi o interposte nell'aria nel cammino della scarica.

La scintilla appare rettilinea, se la distanza esplosiva è piccola (Fig. 315); aumentando questa la scintilla diventa dapprima sinuosa e poi a zig-zag;

---

(1) Per praticare la respirazione artificiale, si stende la persona supina e si fanno muovere le braccia tese, alternativamente per mezzo giro da vicino alle gambe fin sopra alla testa e viceversa, con lo stesso ritmo con cui si respira; oppure aprendo con una stecca di legno la bocca, si afferra la lingua con un fazzoletto, e si tira fuori e si rimanda dentro la bocca, col ritmo detto avanti; ciò anche per delle ore, essendo alcuni fulminati rinvenuti dopo quattro o cinque ore di respirazione artificiale.

per le distanze maggiori si ramifica (Fig. 316) e per distanza troppo grande pur non formandosi una vera scintilla, si osserva nell'oscurità sul polo positivo un fiocco violaceo di luce diffusa e sul polo negativo qualche punto brillante chiamato *stelletta* (§ 174).

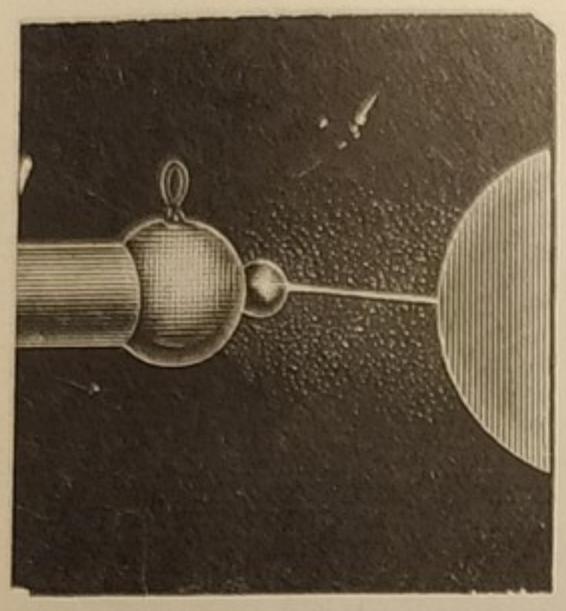


Fig. 315.

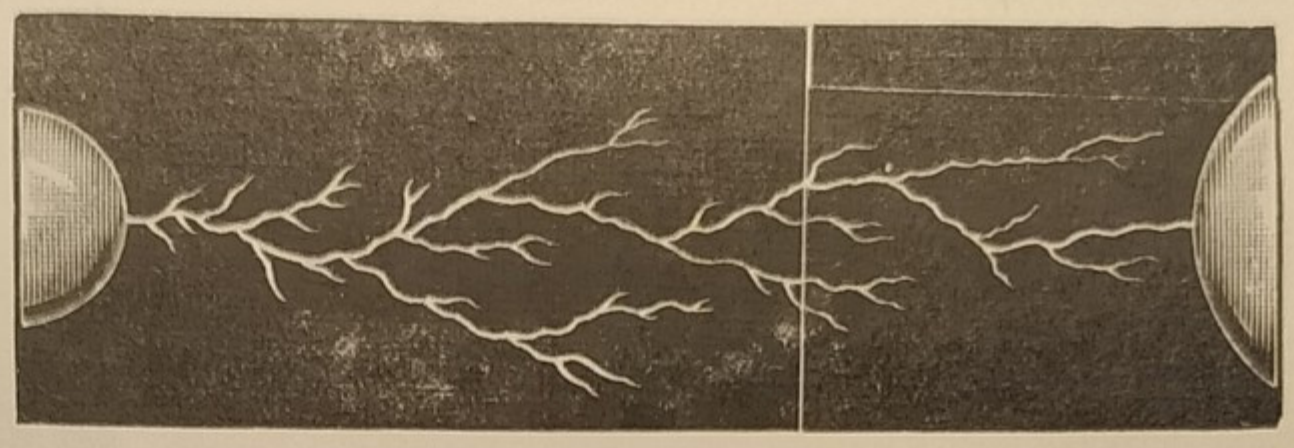


Fig. 316.

Abbiamo visto che la lunghezza della scintilla cresce con la differenza di potenziale (§ 183). Oggi si è riusciti a costruire generatori di elettricità

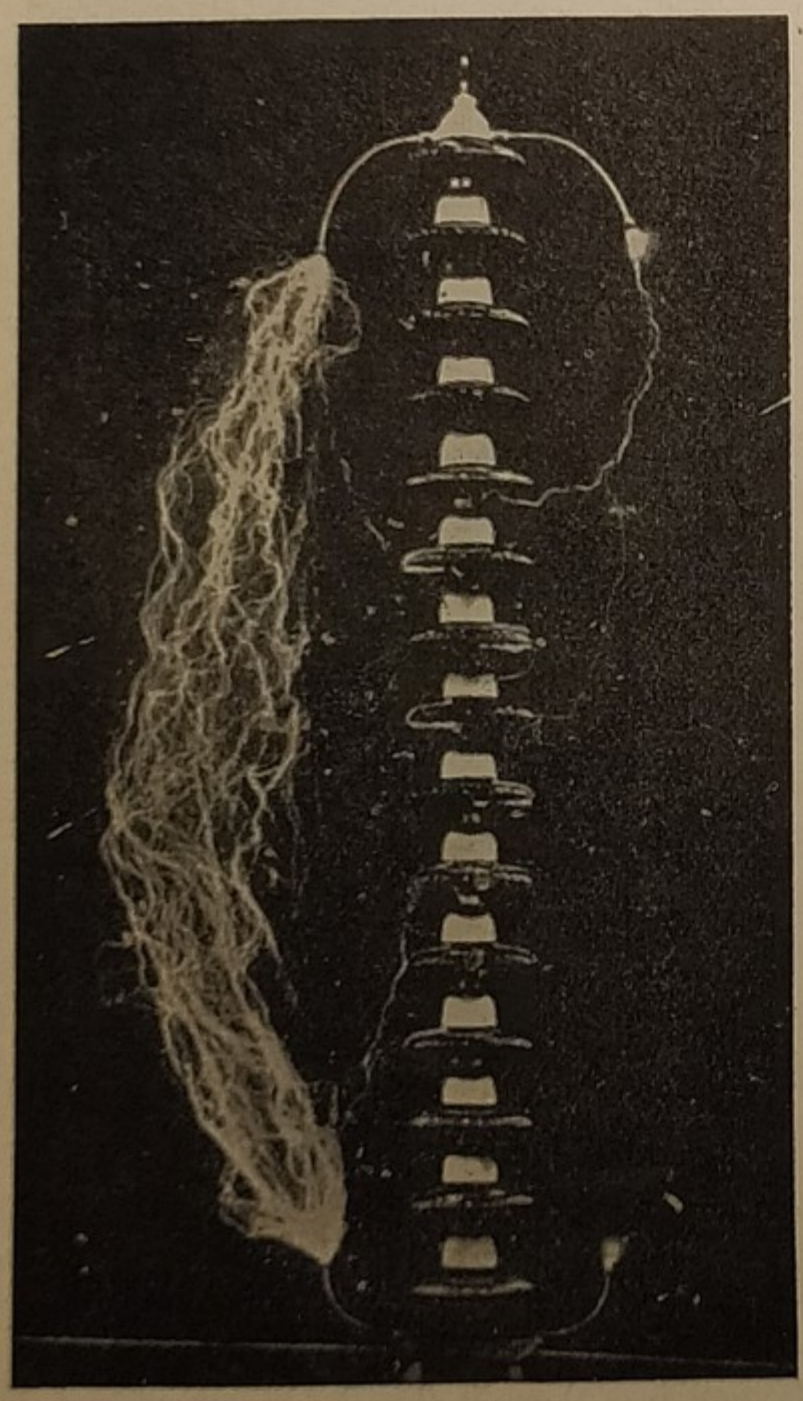


Fig. 317.

Fig. 318.

a più di un milione di volt, capaci di produrre fasci di scintille di oltre 5 m. di lunghezza (Fig. 317), e in tale quantità da generare delle vere cortine di fuoco, (Fig. 318).

Un effetto assai gradevole della scintilla si ottiene coi **quadri scintillanti.** Sono formati da una lastra di vetro, su cui è incollata una striscia di stagnola a tratti paralleli e vicini, formanti un nastro continuo a zig-zag. Nella striscia sono fatte piccole interruzioni, che tutte unite riproducono un disegno, (Fig. 319). Ponendo le estremità A e B della striscia in comunicazione coi due poli di una macchina elettrostatica [1], si formano tante piccole scintille a ciascuna interruzione della stagnola; poichè esse avvengono pressochè contemporaneamente, il disegno appare riprodotto a tratti di fuoco.

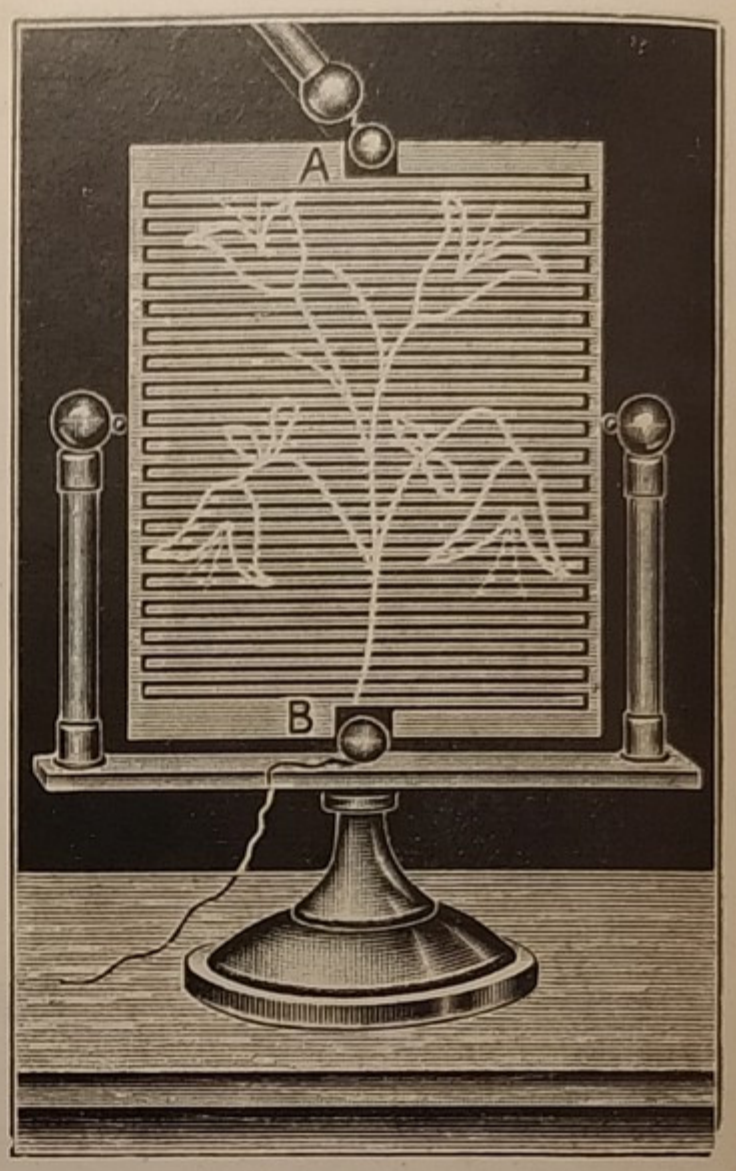


Fig. 319.

203. **Ionizzazione e sue cause.** — Il passaggio dell'elettricità da un polo all'altro è prodotto da piccolissime particelle elettrizzate dell'ordine di grandezza delle molecole, dette **ioni,** che portano seco cariche elettriche da un polo all'altro, (§ 224). Onde le scariche avverranno tanto più facilmente quanto maggiore è il numero di questi ioni, cioè la *ionizzazione dell'aria.*

Gli ioni provengono dalla scissione o dissociazione delle molecole. La causa principale di dissociazione è l'urto fra le molecole; agevolano la produzione degli ioni: l'umidità, la combustione, la rarefazione, la radioattività (§ 215), ecc.

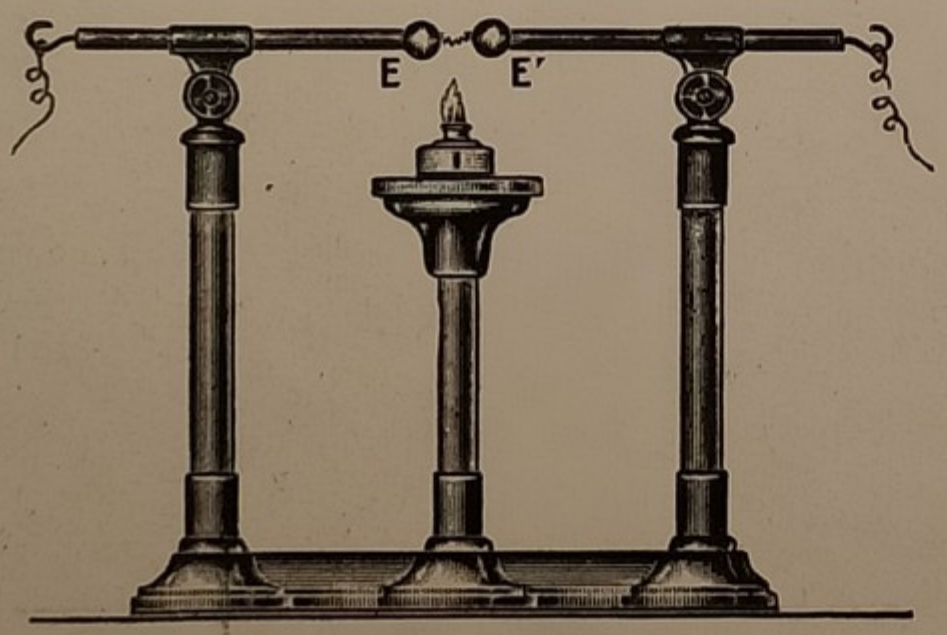


Fig. 320.

Ad es., si allontanino le due bacchette EE' di uno *spinterometro* finchè tra di esse non avvengano più scintille; mettendo sotto EE' una lampada accesa (Fig. 320) le scintille si ripristinano; quindi i prodotti della combustione hanno reso l'ambiente tra E ed E' più conduttore, favorendo e rendendo possibile il passaggio dell'elettricità: cioè hanno reso l'aria più ionizzata, (§ 211).

204. **Scarica nei gas rarefatti.** — Di importanza assai maggiore è lo studio della scarica nei gas rarefatti.

Prendiamo un'ampolla di vetro V, munita alle estremità di due elettrodi E ed E', che attraversando il vetro a tenuta d'aria permettono di portare la scarica dentro l'ampolla, (Fig. 321). I due elettrodi si pongono in comu-

---

(1) Questa e le esperienze successive si eseguiscono meglio e più comodamente con il *rocchetto di Ruhmkorff* (§ 325), anzichè con la macchina elettrostatica.

nicazione coi due poli della macchina elettrica, e nell'ampolla si può fare il vuoto con una buona pompa a mercurio (Vol. 1° - § 188).

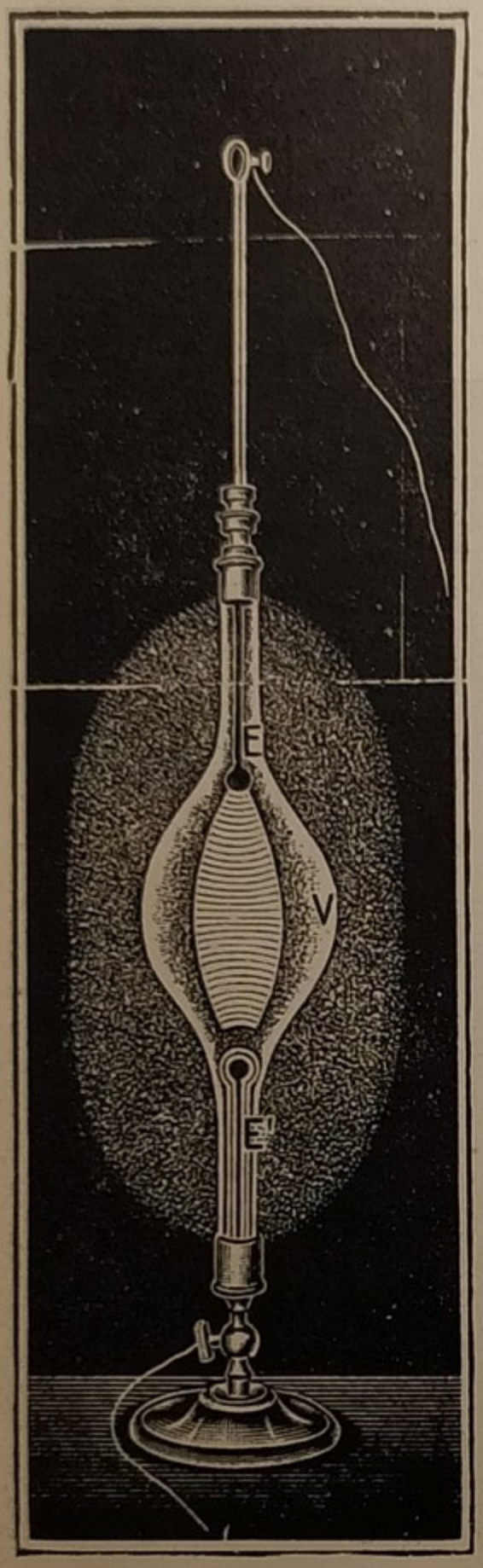


Fig. 321.

Dapprima la scarica dentro l'ampolla assume lo stesso aspetto che nell'aria; ma incominciando a fare la rarefazione, la scarica prima perde le sue angolosità, si raddrizza e si sfuma, diminuendo di splendore. Poi si allarga e la luminosità si diffonde in tutto il tubo, che assume l'aspetto di un globo luminoso; da cui il nome di **uovo elettrico.**

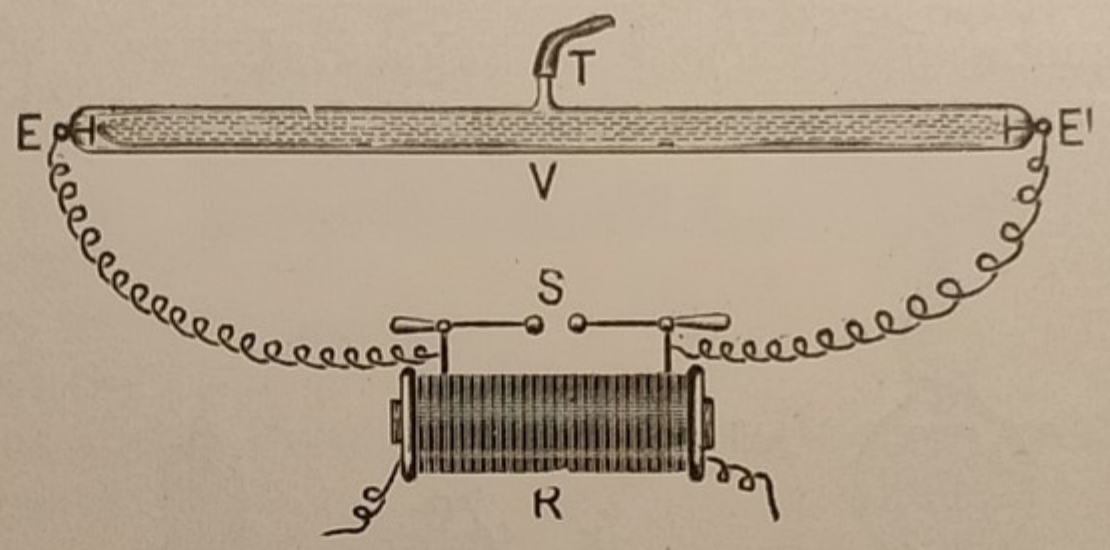


Fig. 322.

In tali condizioni si osserva che la scarica preferisce passare dentro il tubo per una distanza anche di parecchi decimetri, anzichè per pochi millimetri nell'aria; infatti ponendo in derivazione tra gli elettrodi E ed E' di un lungo tubo V uno spinterometro S, le cui palline sono a qualche millimetro di distanza, qui non avvengono scintille; mentre il tubo si illumina, anche se è lungo qualche metro, (Fig. 322). Concludiamo che la resistenza elettrica dentro il tubo rarefatto è assai minore che nell'aria a pressione normale; cioè *la conducibilità dei gas aumenta con la rarefazione.*

Tale resistenza acquista un valore minimo alla pressione di circa 3 mm. di mercurio (Vol. 1° - § 187); poi, aumentando la rarefazione, torna a crescere; e diventerebbe infinita nel vuoto assoluto, (§ 224).

Tubi di vetro di forma svariata, contenenti aria rarefatta a circa 3 mm. di pressione, si chiamano **tubi di Geissler** [1]; la Fig. 323 ne rappresenta qualcuno. Con la scarica si illuminano con aspetto gradevole; la tinta della luce dipende dalla natura del gas contenuto, dalla rarefazione, dalla qualità del vetro di cui è formato il tubo, ed è modificata da sostanze fluorescenti (§ 121) che lo circondano esternamente.

La luce prodotta in questi tubi è accompagnata da pochissimo calore; perciò si chiama **la luce fredda,** e ne è stato preconizzato l'uso per illumi-

---

(1) Geissler Heinrich; n. a Igelshieb nel 1815, m. a Bonn nel 1879.

nazione, allo scopo di ottener luce con minor costo. Da poco tempo si impiegano tubi contenenti il gas *neon*, con che si prolunga la durata di essi. Dando al tubo la forma di lettera o di decorazione, si fanno in questa maniera quelle scritture luminose che oggi sono molto diffuse a scopo di pubblicità.

Aumentando nel tubo la rarefazione oltre i 3 mm., la luce cambia di tinta; dapprima da violacea diventa aranciata, poi cerulea; il *catodo*, cioè l'elettrodo posto in comunicazione col polo negativo della macchina elettrica, è circondato da un bagliore color lavanda, ed è separato dalla luce rimanente da uno strato non illuminato **f,** chiamato lo **spazio oscuro di Faraday,** (Fig. 324 - *B*). Progredendo con la rarefazione, il bagliore al catodo si allunga e si separa dal catodo mediante un nuovo spazio

Fig. 323.

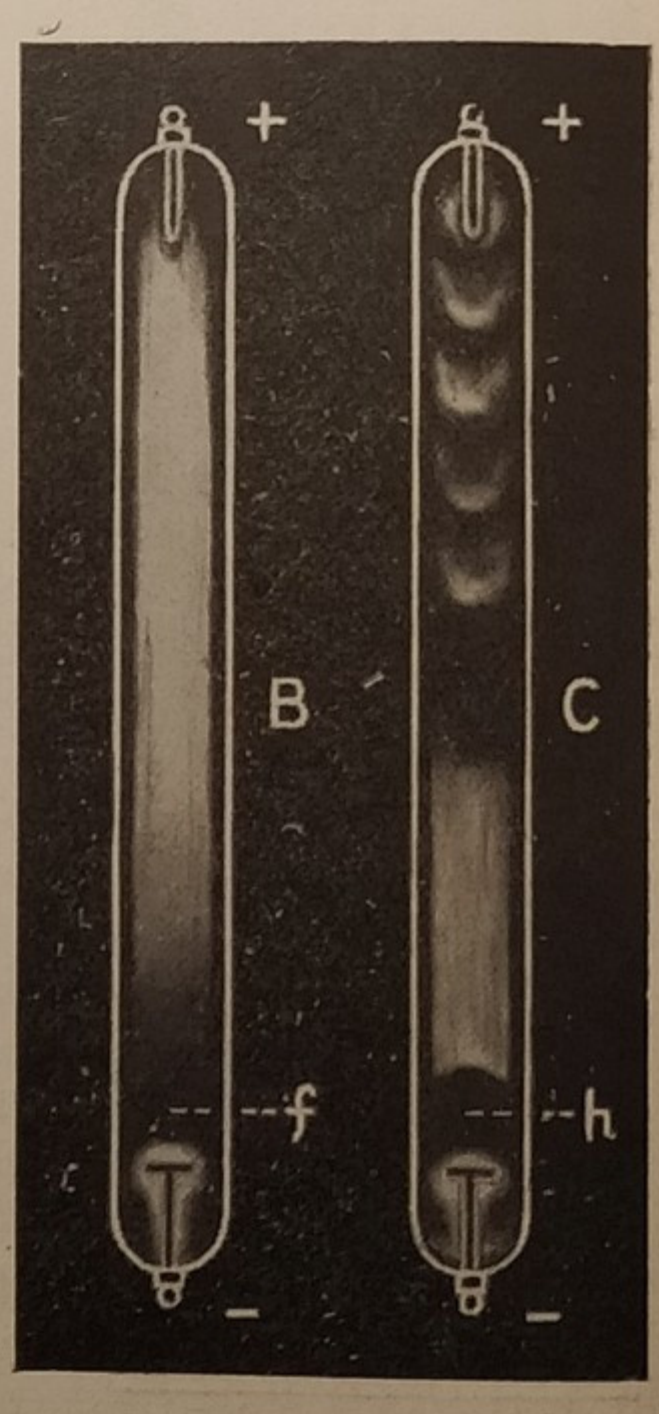


Fig. 324.

oscuro **h,** (Fig. 324 - *C*), detto **spazio oscuro di Hittorf o di Crookes,** ed il catodo è circondato da un'aureola rosea. Alla pressione di circa 0,1 mm. la luce si divide in strati alternativamente luminosi ed oscuri (Fig. 324 - *C*); la scarica si chiama allora **stratificata.**

Progredendo la rarefazione le stratificazioni si allargano, finchè a circa 0,01 mm. scompaiono quasi del tutto; allora *dentro* al tubo non si vede più luce; ma le pareti del vetro internamente diventano fluorescenti, specialmente rimpetto al catodo, illuminandosi con una tinta verde-pomo caratteristica.

205. **Raggi catodici.** — Tale fluorescenza è dovuta a radiazioni che partendo dal catodo, *perpendicolarmente alla superficie di questo*, si propagano in linea retta, e colpendo il vetro ne eccitano la fluorescenza, illuminandolo.

Si prenda infatti un tubo di vetro a forma di pera (Fig. 325), in cui sia stato fatto il vuoto a circa 0,01 di mm. Sia *A* il catodo e *P* l'*anodo* cioè l'elettrodo posto in comunicazione col polo positivo della macchina elettrica; avvenendo la scarica si illumina vivamente la calotta *O* del tubo che è posta di rimpetto al catodo. Se ora si raddrizza una crocetta *B* di alluminio, congiunta a cerniera con *P*, si disegna in *O l'ombra* di tale croce, come se il catodo fosse una sorgente luminosa. Si ricordi (§ 4) che studiammo la teoria delle ombre come prova della propagazione rettilinea della luce; anche ora adunque si tratta di radiazioni propagantisi in linea retta. Perciò furono chiamati **raggi catodici.** Essi hanno le seguenti proprietà:

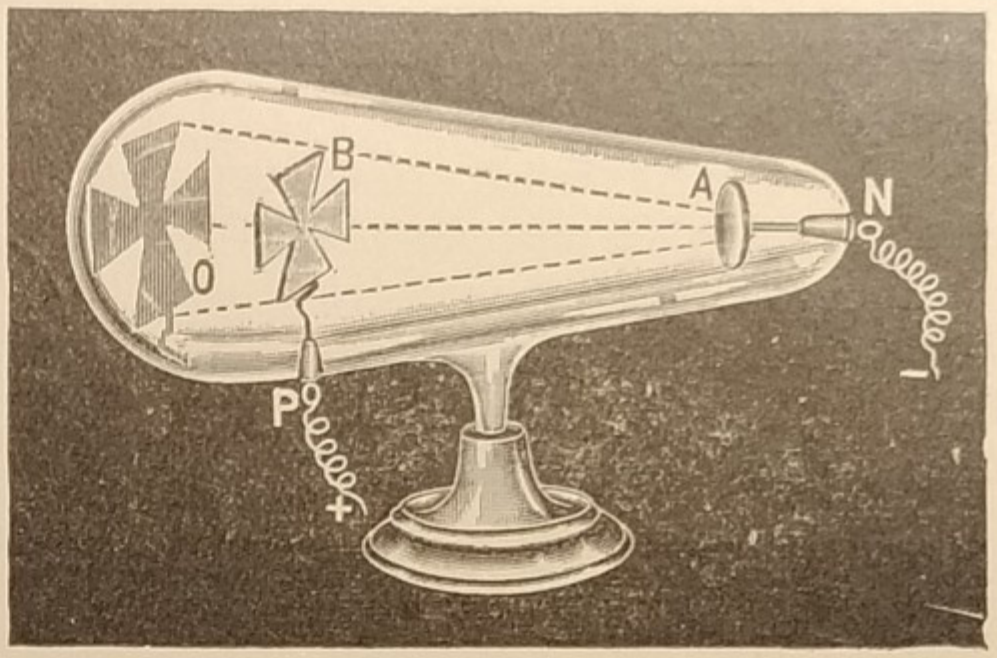


Fig. 325.

1. **Hanno azione calorifica.** Concentrati su una lastrina di platino, la arroventano. La concentrazione avviene dando al catodo la forma di calotta; poichè i raggi catodici partono perpendicolarmente al catodo, le normali alla superficie sferica, come sappiamo, concorrono nello stesso punto, che è il centro della sfera. La Fig. 326 mostra come si eseguisce l'esperienza.

Fig. 326.

2. **Hanno azione meccanica.** Se investono le alette superiori di un leggero mulinello di mica (Fig. 327), imprimono ad esse una leggera spinta e il mulinello si mette a girare.

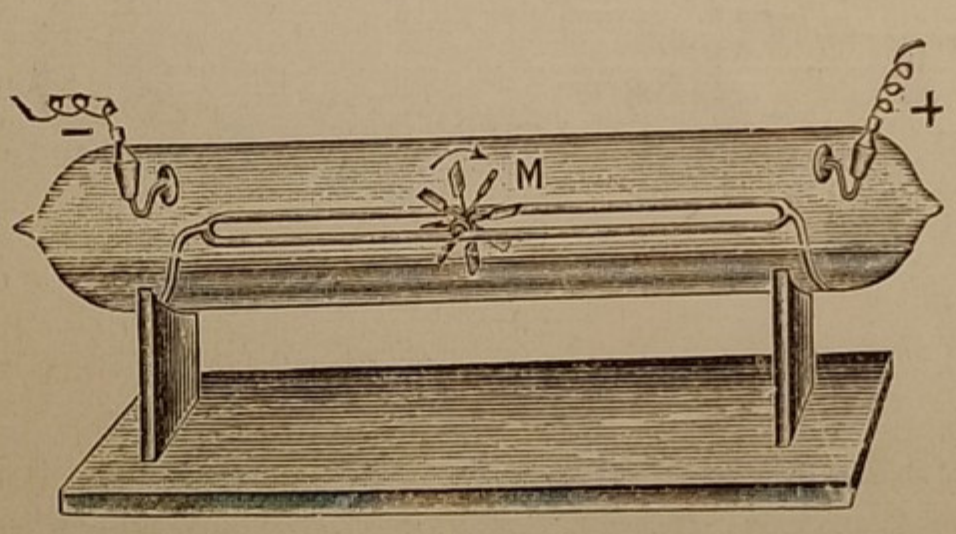


Fig. 327.

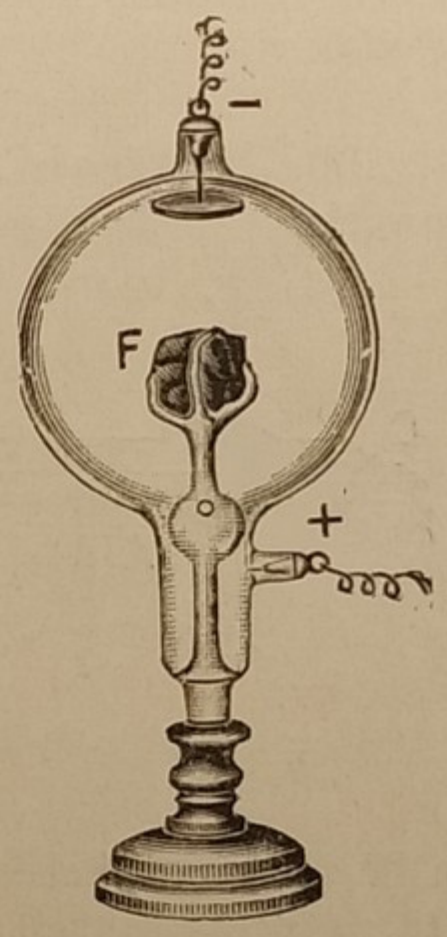


Fig. 328.

3. **Eccitano la fosforescenza.** Se nel cammino dei raggi catodici si pone una sostanza fosforescente (§ 120) *F*, essa si illumina vivamente (Fig. 328), e permane alquanto luminosa anche quando è cessata la scarica nel tubo. Se in *F* si pone un diamante, brilla di luce verde; un rubino di splendida luce rossa; il solfuro di calcio di luce azzurrina, ecc.

4. **Trasportano una carica elettrica negativa.** Si prenda un tubo rappresentato in sezione in Fig. 329. Di faccia al catodo *C* si pone un elettrodo *F*

in comunicazione con un elettroscopio: F è circondato da un involucro metallico $ABDE$, che fa da anodo ed ha un foro O. Facendo funzionare il tubo, si vedrà l'elettroscopio caricarsi di elettricità negativa, per le cariche che partendo da C penetrano per il foro O.

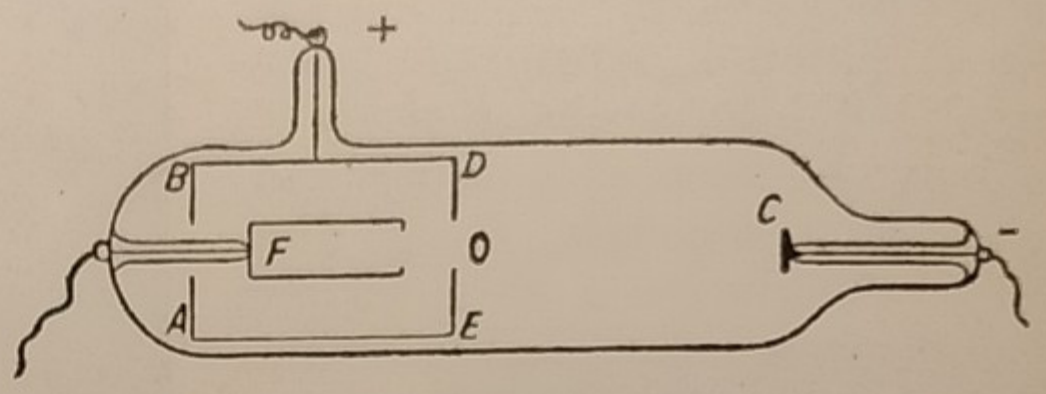


Fig. 329.

5. **Sono deviati in un campo elettrostatico.** Si prenda un *tubo di Braun* [1] rappresentato in Fig. 330. Dal catodo C parte un fascio di raggi catodici, che attraversano dapprima un diaframma A funzionante da anodo, indi un secondo diaframma B, passano tra due laminette L ed L_1, e colpiscono in S_1 un dischetto fluorescente, ove si vede un punto luminoso. Mettendo in comunicazione L_1 col polo + ed L col polo — di una macchina elettrostatica in funzione, il punto luminoso S_1 si sposta in S_2; cioè il fascio catodico viene deviato verso la lamina positiva.

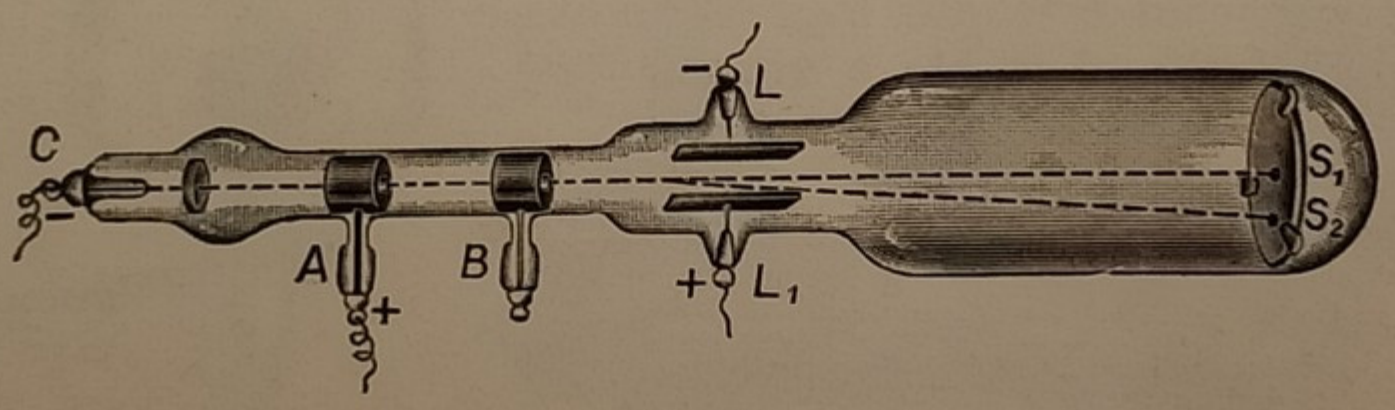


Fig. 330.

6. **Sono deviati dalle calamite.** La deviazione avviene anche se invece di un corpo elettrizzato, si avvicina al tubo un polo magnetico, (§ 138).

7. **Impressionano la lastra fotografica.**

Questi tubi ad alta rarefazione in cui si producono i raggi catodici, sono stati studiati la prima volta da Crookes [2], e si chiamano perciò **tubi di Crookes.**

206. **Elettroni.** — Si suppone oggi che i raggi catodici siano dovuti a particelle piccolissime, *cariche di elettricità negativa*, lanciate dal catodo con grande velocità. Dalla deviazione osservata nel tubo di Braun (Fig. 330), si può dedurre il valore della velocità v di tali particelle, ed il rapporto e/m tra la carica negativa e di una particella e la sua massa m. La velocità dipende dalla differenza di potenziale tra catodo e anodo, perchè da questa dipende la forza elettrica che lancia le particelle. Per le differenze di potenziale usuali (sino a circa 100000 V), tale velocità varia da qualche decina di km. sino a circa 100000 km. al minuto secondo; ma in tubi con vuoto molto spinto, in cui si richiedono perciò tensioni più elevate, la velocità di tali particelle raggiunge i $^9/_{10}$ di quella della luce.

---

(1) Braun Karl, dell'Università di Strasburg; n. a Fulda nel 1850, m. a New York nel 1918.

(2) Crookes Sir William; n. a Londra nel 1832, m. ivi nel 1919.

Il valore del rapporto e/m si è trovato indipendente dalla tensione adoperata, dalla natura del catodo, dalla natura del gas racchiuso nel tubo; si è trovato che:

$$1) \qquad \frac{e}{m} = 1{,}77 \times 10^8,$$

se la carica e si misura in *coulomb* e la massa m in grammi.

Si è calcolato che la massa di ciascuna particella è circa $^1/_{1840}$ di quella di un atomo di idrogeno. Queste particelle si chiamano **elettroni,** e rappresentano la più piccola carica elettrica che si può immaginare isolata; o, per così dire, un atomo elettrico. Vedremo (§ 216) che si suppone che questi elettroni facciano parte degli atomi del catodo. Occorre un'energia, che in questo caso è quella fornita dalla scarica, per staccarli dal catodo e lanciarli con enorme velocità nello spazio.

207. **Positroni - Raggi anodici.** — Dall'anodo non partono *elettroni positivi*, cioè particelle dell'ordine di grandezza degli elettroni, ma carichi di elettricità positiva. Vedremo in seguito (§ 223) che l'esistenza di tali particelle, chiamate **positroni,** è stata dimostrata in altri fenomeni. Però alcune esperienze mostrano l'esistenza anche di raggi partenti dall'elettrodo positivo, e perciò chiamati **raggi anodici,** o **raggi canale,** scoperti da Goldstein (§ 221); si ammette che siano dovuti a particelle dell'ordine di grandezza degli atomi, cioè **ioni,** elettrizzati positivamente, che si propagano con velocità inferiore a quella degli elettroni.

208. **Raggi X.** — Ponendo accanto ad un tubo di Crookes un pezzo di vetro, questo non diviene fluorescente; e poichè la prima proprietà osservata sui raggi catodici era appunto quella di destare la fluorescenza del vetro, vuol dire che i raggi catodici non escono dal tubo; il vetro difatti è opaco per essi.

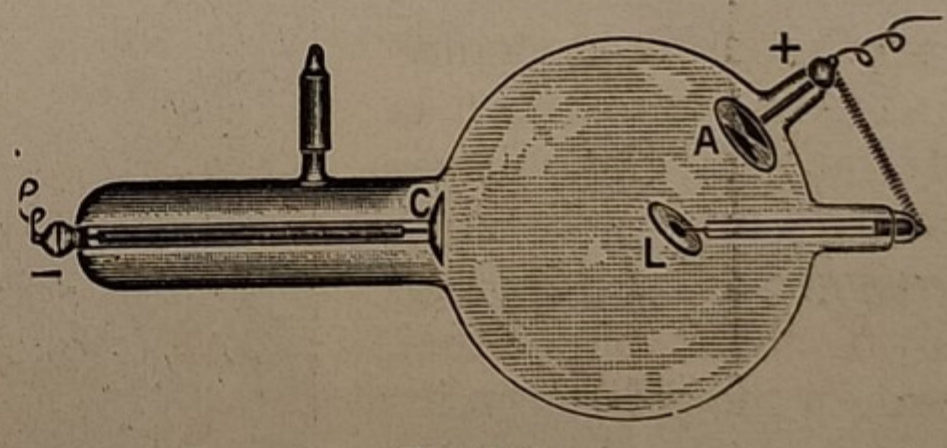


Fig. 331.

Sostituendo una piccola parte della parete del tubo con una sottile lastra di alluminio, che si lascia alquanto attraversare dai raggi catodici, il Lenard [1] riuscì a dimostrare l'esistenza di questi raggi anche fuori del tubo: ma a breve distanza, poichè l'aria diffonde i raggi catodici, come fa la nebbia per la luce.

Però dal tubo di Crookes escono altri raggi. Infatti, ponendo avanti ad esso un pezzo di cartone, spalmato con *platino-cianuro di bario*, si vede nell'oscurità questa sostanza illuminarsi con la solita tinta verde-pomo.

Questi raggi furono scoperti dal Röntgen [2] nel 1895, e furono perciò chiamati **raggi di Röntgen,** od anche **raggi** X per la loro natura incognita. Essi hanno origine nel punto in cui i raggi catodici colpiscono il vetro del tubo di Crookes o qualunque altro ostacolo che sia nel loro cammino; e si propagano in linea retta in tutte le direzioni.

---

(1) Lenard Filippo; n. a Presburgo (oggi Bratislava) nel 1862, vivente.
(2) Röntgen Wilhelm, fisico tedesco; n. a Lennep nel 1845, m. a Monaco nel 1923.

Un tubo più adatto per la produzione dei raggi X è quello rappresentato in prospetto nella Fig. 331 e in sezione nella Fig. 332; è chiamato **tubo focus bianodico.** In esso il catodo è una piccola calotta C di alluminio, in modo che i raggi catodici partenti da esso si riuniscono in un punto, come si è visto al N. 1 del § 205. In questo punto, in questo *foco* (da cui il nome *focus*), è posta una lastrina L di platino, chiamata **anticatodo.** Qui hanno origine i raggi X, che escono poi lateralmente dal tubo nella direzione S, come mostra il fascio punteggiato della Fig. 332. A è l'anodo, congiunto esternamente con l'anticatodo; quindi in conclusione gli anodi sono due: A ed L; da ciò il nome di tubo *bianodico*.

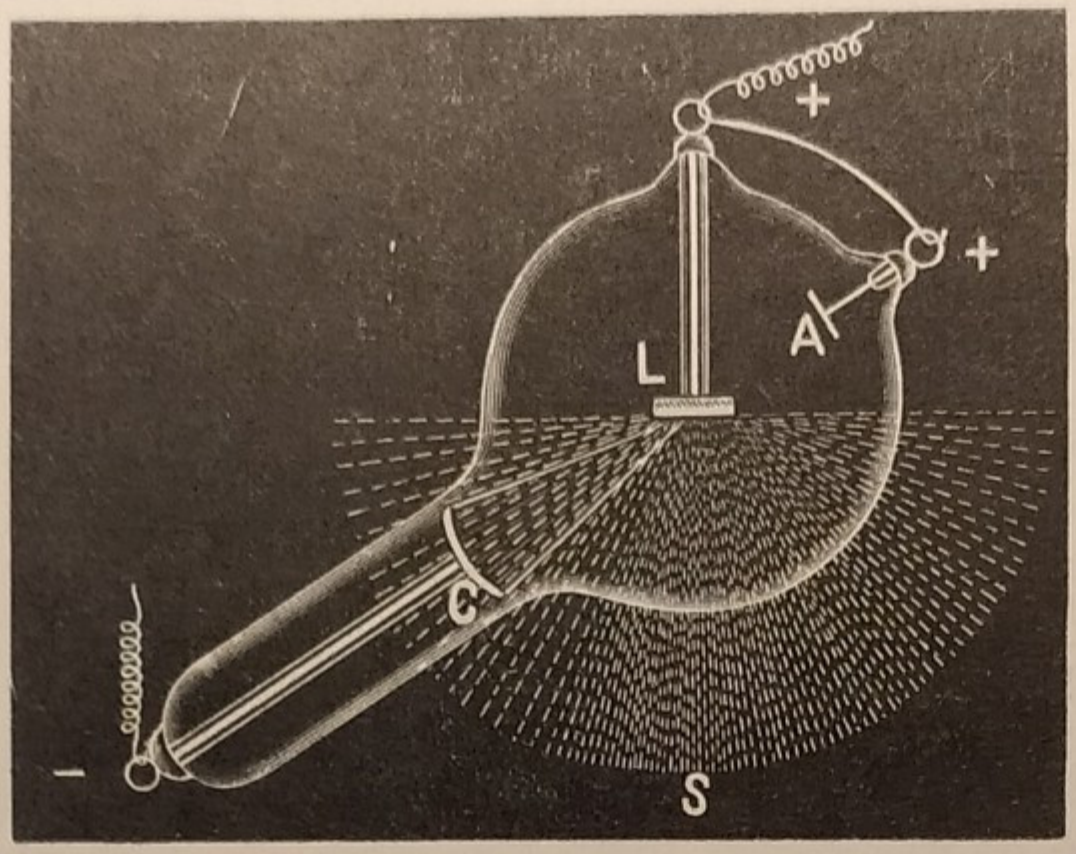


Fig. 332.

Con questo tubo si possono dimostrare le principali proprietà dei raggi X; cioè:

1. **Attraversano più o meno i varî corpi.** I corpi meno densi, come il legno, la carta, la stoffa, ecc., opachi per la luce ordinaria, sono *trasparenti* per i raggi X; i corpi più densi, come i metalli, sono invece opachi. Il vetro, l'acqua, l'alluminio, sono semitrasparenti.

2. **Destano la fluorescenza e la fosforescenza** di alcuni corpi, come il platino-cianuro di bario, il solfuro di zinco, ecc.

3. **Impressionano la lastra fotografica.**

4. **Ionizzano i gas che attraversano.**

Fig. 333.

5. **Non sono deviati nè dai corpi elettrizzati nè dalle calamite;** questa proprietà distingue nettamente i raggi X dai raggi catodici.

6. **Non si riflettono nè si refrangono regolarmente.**
7. **Incontrando un corpo opaco per essi lo riscaldano lievemente.**

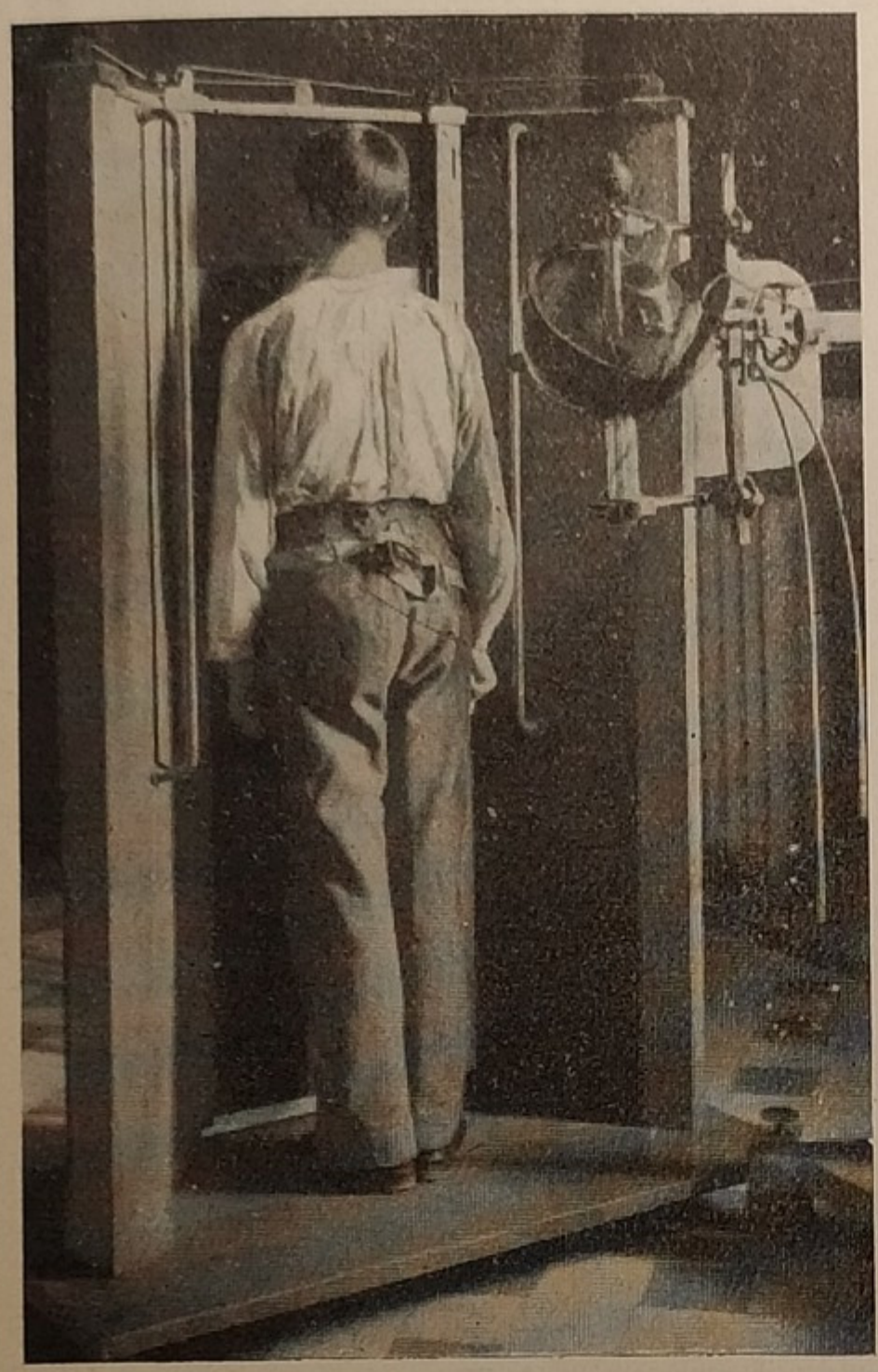


Fig. 334.

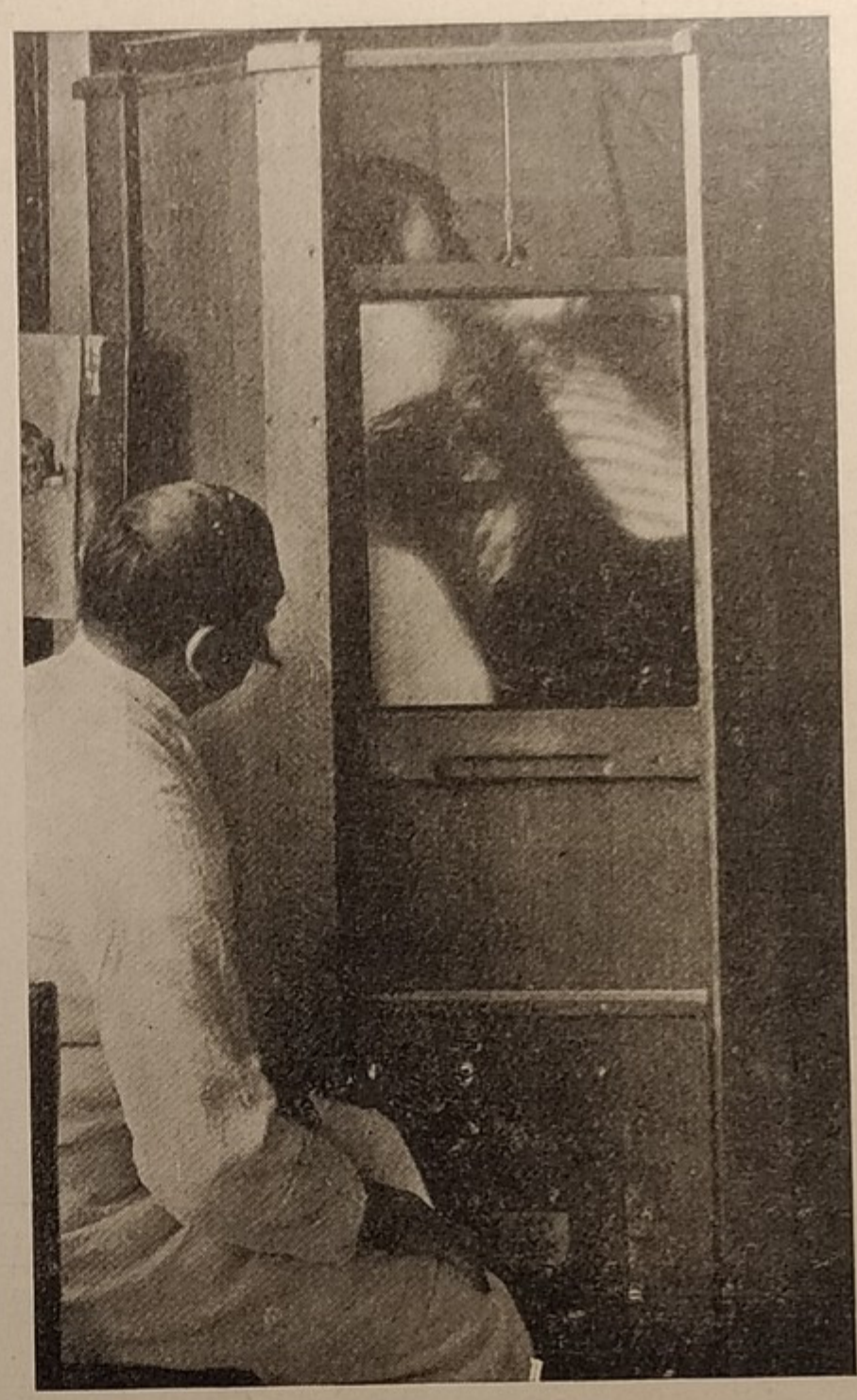


Fig. 335.

Sono state fatte diverse ipotesi per spiegare la natura dei raggi X. Si riteneva dapprima che fossero dovuti a vibrazioni disordinate e non periodiche, generate dall'urto dei raggi catodici contro un ostacolo; come un martello colpendo un pezzo di legno provoca un rumore (cioè poche vibrazioni alla rinfusa, non periodiche, e quindi non costituenti un suono regolare), così un elettrone colpendo l'anticatodo vi provoca poche vibrazioni, che essendo disordinate e non periodiche, non dànno origine a raggi aventi le proprietà della luce.

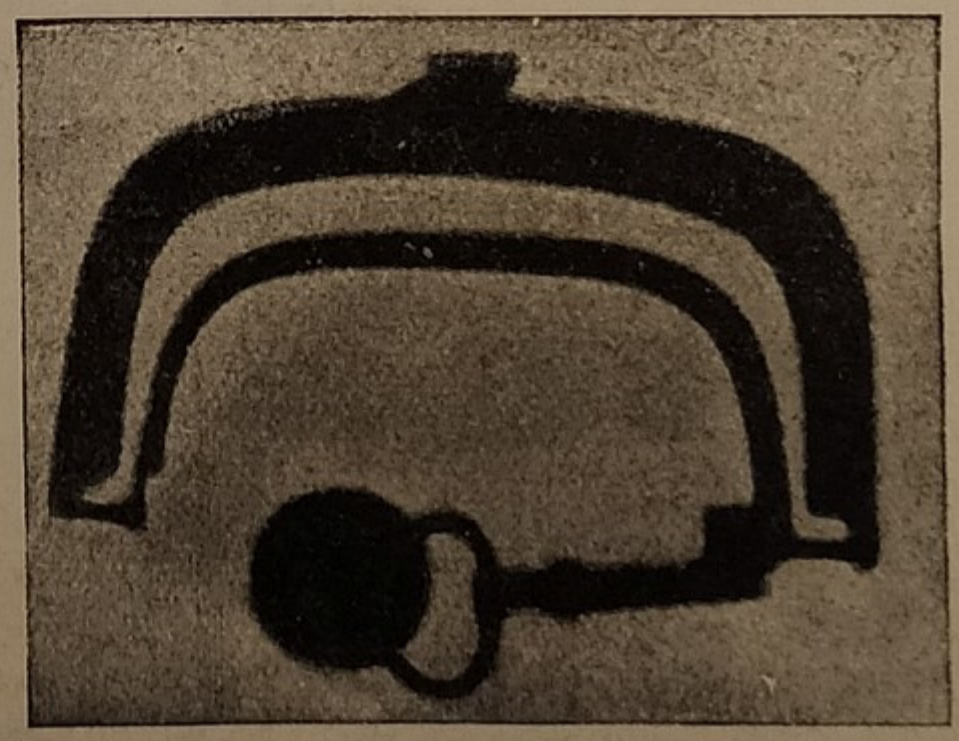


Fig. 336.

Ma Laue nel 1913 riuscì a dimostrare che i raggi X attraversando i cristalli, presentano fenomeni d'interferenza come quelli dei raggi luminosi; inoltre essi si propagano con la velocità della luce. Per ciò oggi ammettiamo che i raggi X siano dovuti

a vibrazioni di lunghezza d'onda minore, e quindi di frequenza maggiore, di quelle dei raggi ultravioletti (§ 116) cioè a vibrazioni comprese tra qualche quadrilione e qualche decina di quintilioni al minuto secondo.

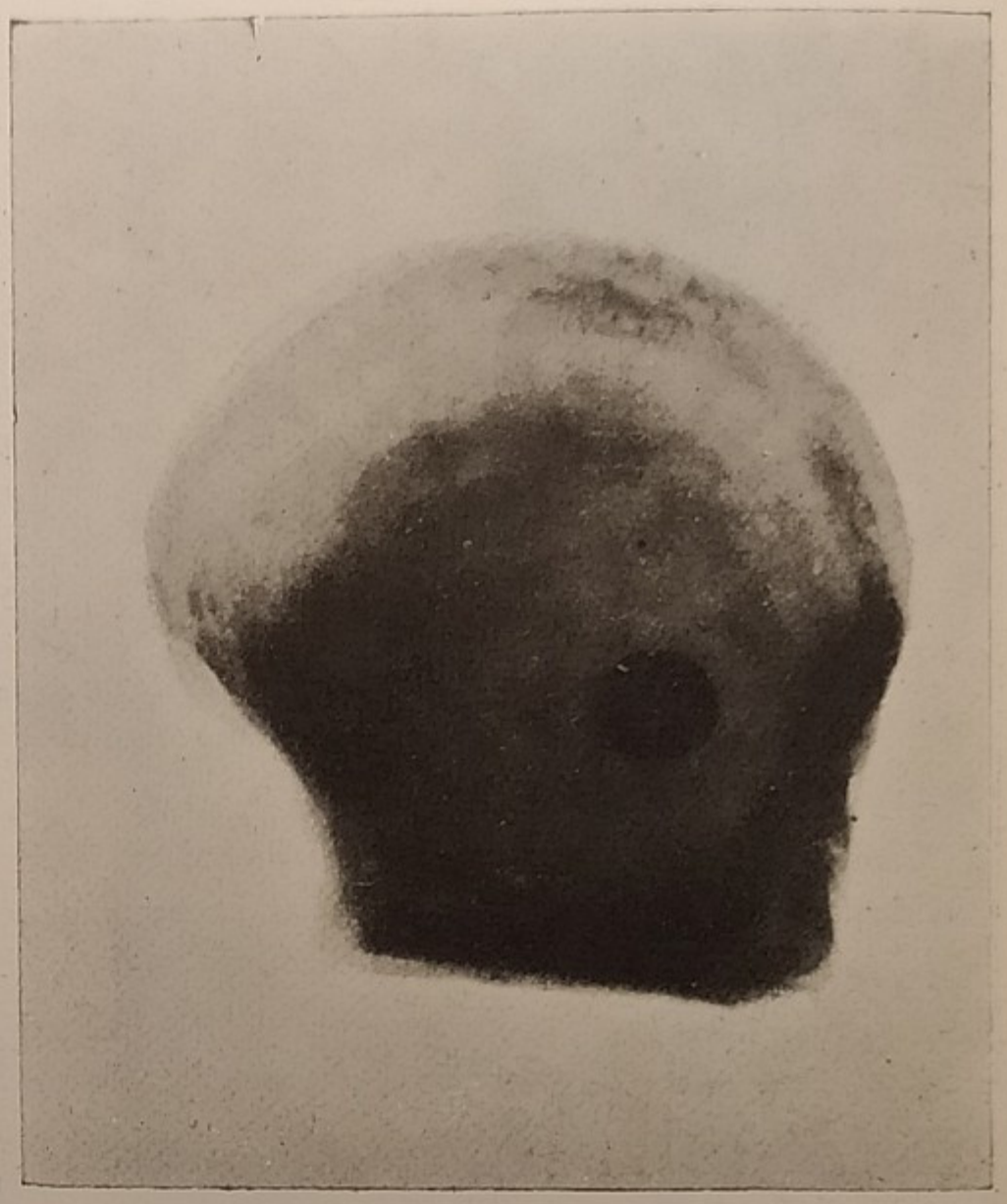


Fig. 337.

209. **Fluoroscopìa.** — Se fra un tubo focus ed uno schermo spalmato di platino-cianuro di bario, detto il **fluoroscopio,** si interpone un oggetto formato da parti più dense e altre meno dense, ad es. una scatola chiusa di compassi, i raggi *X* attraversano il legno della scatola, e dietro ad esso illuminano lo schermo; non attraversano invece le parti metalliche che formano ombra sullo schermo. Cioè sul fluoroscopio si delineano *le ombre* dei compassi su fondo luminoso. È così possibile scoprire oggetti racchiusi entro corpi opachi alla luce, cioè invisibili agli occhi.

Parimenti, interponendo parte del corpo umano, p. es. la mano, si vedranno nettamente le ombre delle ossa più oscure in campo più chiaro, essendo le ossa più dense e quindi più opache dei muscoli e della pelle. Tale processo è chiamato **fluoroscopìa** ed è molto diffuso oggi in medicina e chirurgia, per scoprire alterazioni o fratture di organi interni del corpo umano, ed oggetti estranei in esso.

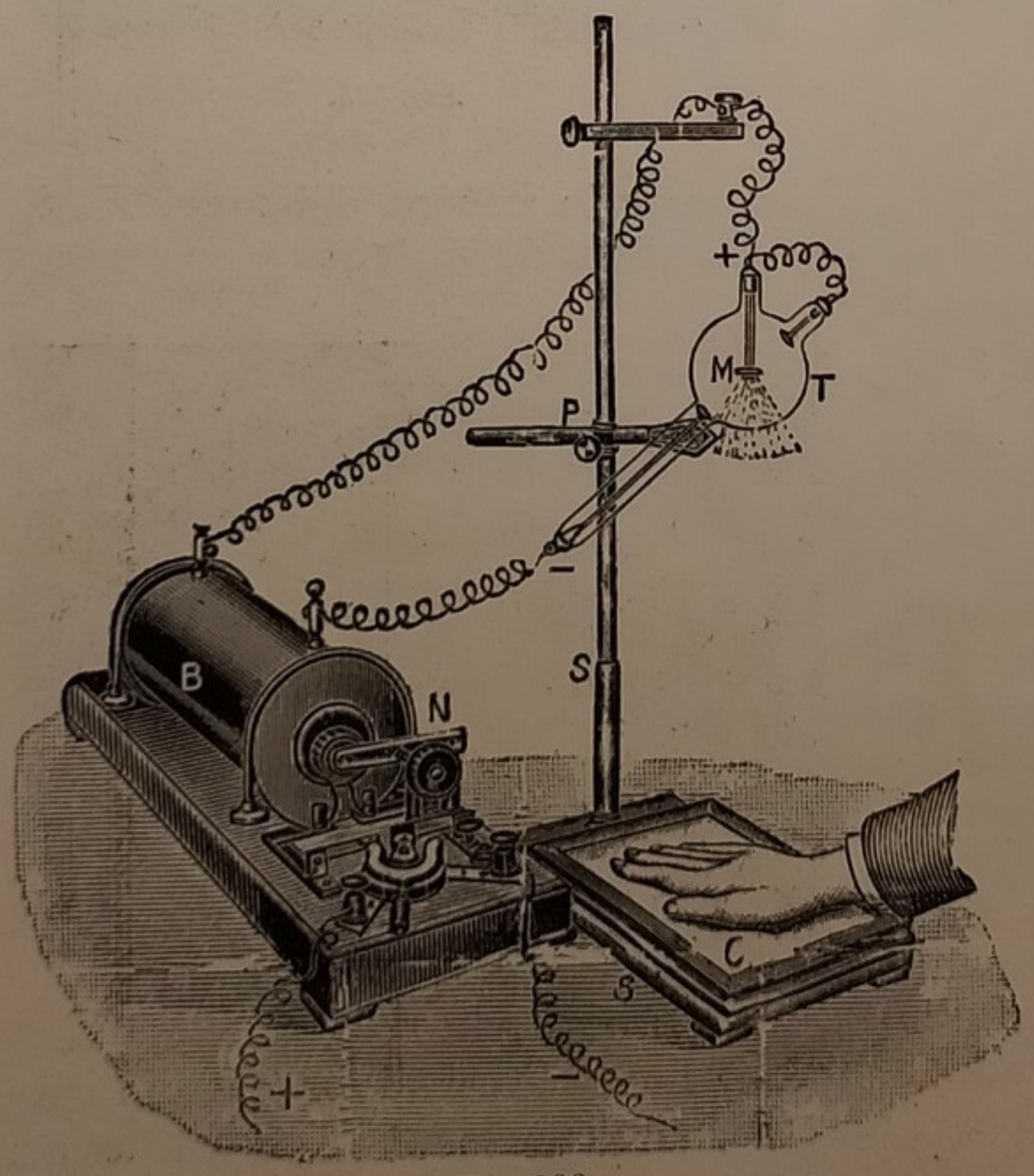


Fig. 338.

Le Figg. 333-335 mostrano un impianto moderno di fluoroscopìa, per l'esame del torace; nella Fig. 333 è il macchinario per la produzione delle scariche, in mezzo e in alto il rocchetto di Ruhmkorff (§ 325) con l'asse verticale; in Fig. 334 è il tubo generatore

dei raggi X, collocato dietro la persona da osservare; la Fig. 335 mostra ciò che si vede al fluoroscopio.

La Fig. 336 mostra la fluoroscopìa di un portamonete di pelle con cerniera di metallo, contenente una moneta ed una chiavetta; si vedono distintamente le ombre delle parti metalliche, mentre la borsa di pelle non lascia alcuna traccia.

La Fig. 337 mostra la fluoroscopìa di una perla contenuta nell'interno dell'ostrica che l'ha prodotta.

Fig. 339.

210. **Radiografia.** — Sostituendo al fluoroscopio una lastra fotografica racchiusa in una scatola C di cartone, per proteggerla dalla luce ordinaria (Fig. 338), si rendono fisse queste ombre, e se ne conserva l'immagine sulla lastra. Il processo si chiama allora **radiografia.**

La Fig. 339 mostra, in proporzioni ridotte, la radiografia della mano e la Fig. 340 la radiografia di una rana.

211. **Tubi termoionici.** — Nel § 206 abbiamo visto che la scarica elettrica provoca l'emissione degli elettroni. Ma essa non è la sola energia capace di staccare elettroni dagli atomi e lanciarli nello spazio. Questa disgregazione può essere anche provocata dalle alte temperature. È per questa ragione che una fiamma ionizza l'aria (§ 203); infatti, per l'alta temperatura, alcune molecole della fiamma perdono un elettrone e si trasformano in ioni positivi; mentre gli elettroni distaccatisi si attaccano a molecole neutre e producono ioni negativi.

Parimenti gli elettroni possono staccarsi da un corpo incandescente. Questo fenomeno fu osservato da Edison nel 1890, nelle lampade ad incandescenza da lui inventate (§ 285); e fu attribuito ad atomi di carbonio, che si staccavano dal filamento incandescente e venivano proiettati attorno ad esso. Il fenomeno può essere dimostrato nel seguente modo. In un globetto di vetro L (Fig. 341) in cui sia stato fatto il vuoto molto spinto, è contenuto un filamento F di metallo difficilmente fusibile (tantalio, tungsteno, ecc.), che può portarsi all'incandescenza per mezzo dell'elettricità, come avviene in una comune lampadina elettrica. Di fronte ad F è un elettrodo metallico P, elettrizzato positivamente perchè in comunicazione col polo + di una opportuna sorgente di elettricità. Il filamento F incan-

descente emette elettroni, che attratti da P si dirigono su questo elettrodo e gli cedono la loro carica negativa; si stabilisce così un passaggio di elettricità dall'elettrodo al filamento.

Vedremo in seguito (§ 362) come viene utilizzato questo importante fenomeno nelle radiocomunicazioni.

Applicando il principio precedente, oggi si costruiscono **tubi termoionici, o tubi di Coolidge,** (1) per la produzione dei raggi X, nei quali gli elettroni sono prodotti da un filamento H di tungsteno (Fig. 342), portato all'incandescenza con una corrente elettrica di intensità regolabile. Quanto più elevata è la temperatura di questo filamento, tanto più elettroni esso emette, e in conseguenza aumenta *l'intensità* dei raggi X ottenuti dal tubo. Ma la velocità di tali elettroni sarebbe piccola ed insufficiente allo scopo. Se ne accelera il movimento, circondando il filamento H con un astuccio K di molibdeno, portato ad un alto potenziale negativo con mezzi opportuni.

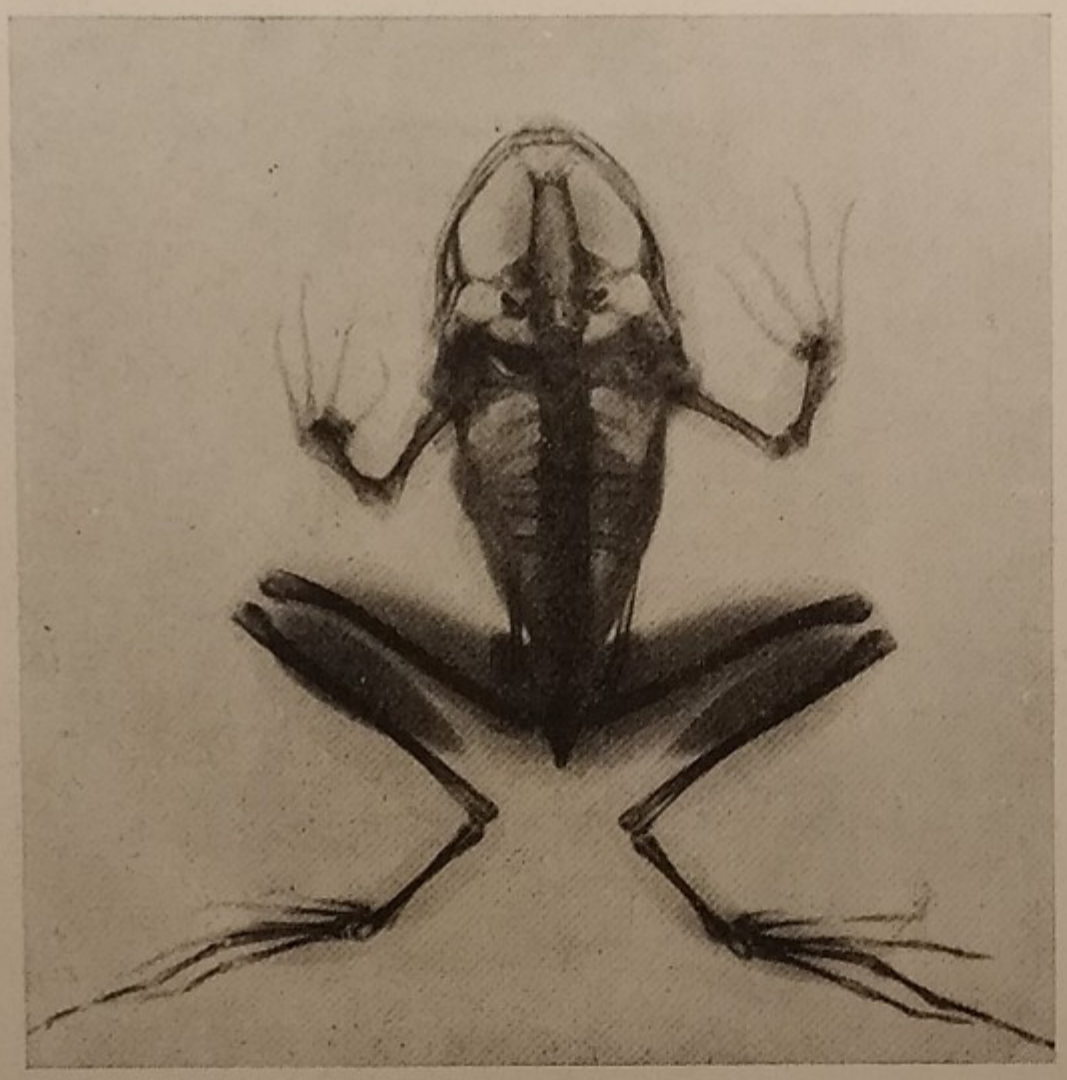


Fig. 340.

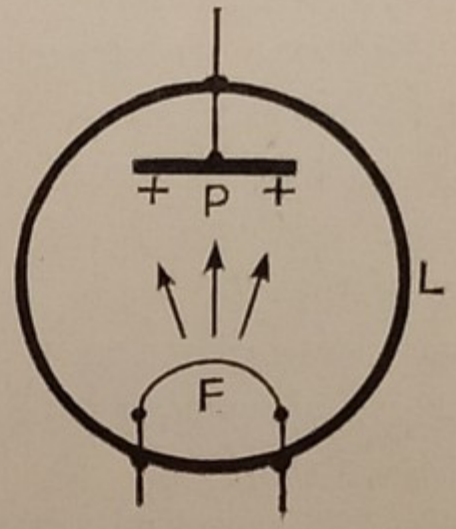


Fig. 341.

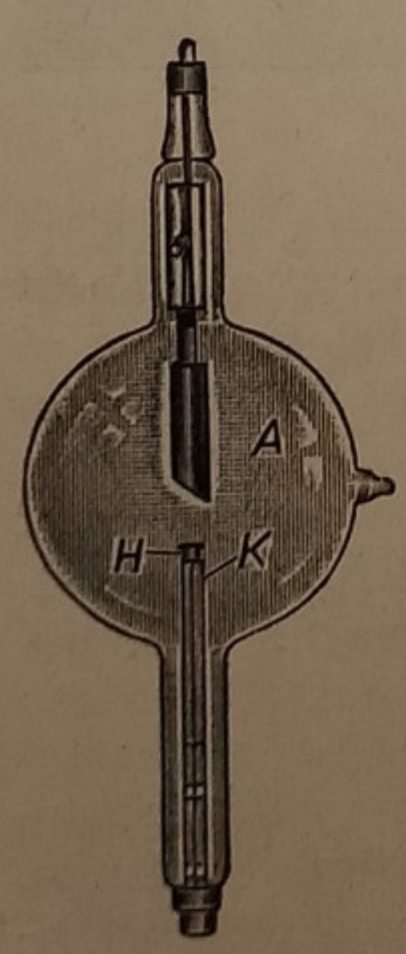


Fig. 342.

Quest'elettrodo respinge gli elettroni e li lancia, con grande velocità, contro l'anticatodo A, portato ad alto potenziale positivo, su cui si generano i raggi X, nel modo già studiato al § 208.

Questi tubi, oltre ad essere di uso più comodo, hanno il vantaggio di poter meglio regolare sia la quantità degli elettroni (variando la temperatura del filamento), sia la loro velocità (variando il potenziale dell'elettrodo negativo); aumentando la velocità degli elettroni, si ottengono raggi X più penetranti.

La Fig. 343 mostra uno di questi tubi di potenza tale, da permettere la radiografia del corpo umano con una posa di appena un millesimo di secondo.

(1) Coolidge William, prof. di fisica a Washington; n. a Hudson Mass nel 1873.

212. **Applicazione dei raggi X.** — La principale applicazione dei raggi *X* è quella accennata dell'investigazione dell'interno del corpo umano a scopo di diagnosi; con la radioscopia e la radiografia non solo vengono svelati oggetti estranei nel corpo, ma si rivela l'esistenza di fratture, il risultato di un'*ingessatura*, ecc. Dentisti moderni fanno l'analisi dei denti, prima di ripararli. Il medico, osservando l'ombra del cuore, può scoprire irregolarità nella pulsazione, o dilatazioni di esso o dell'aorta; dalla presenza di punti o di masse più oscure nell'esame del torace, si può dedurre lo stato più o meno avanzato della tubercolosi; per l'esame del funzionamento dell'apparato digerente, si fa la radiografia col *pasto di prova*, introducendo cioè nel cibo un sale di bismuto che lo rende più opaco, sicchè può essere seguìto nel suo viaggio nell'intestino.

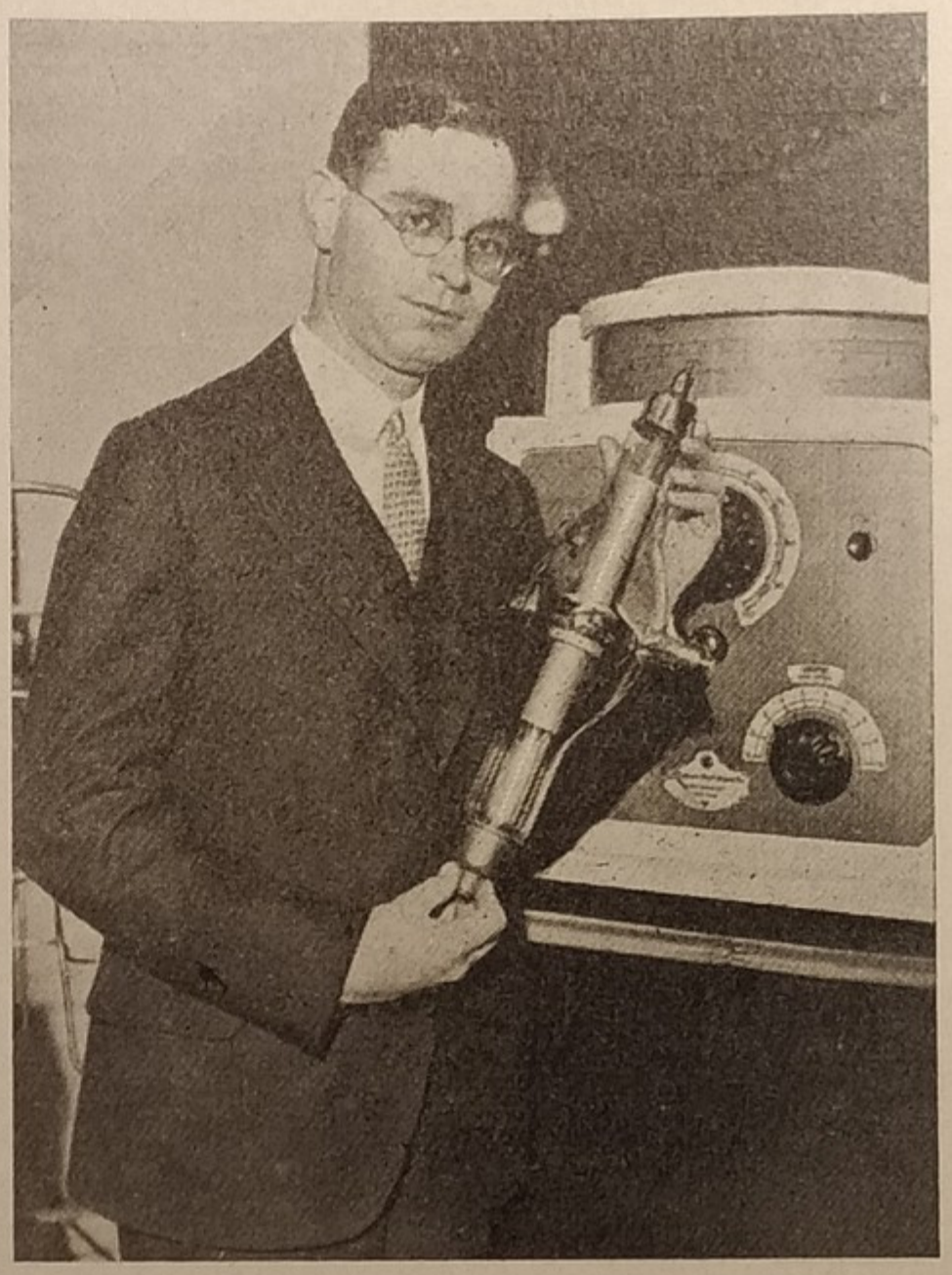


Fig. 343.

I raggi *X* hanno azione energica sulla pelle; furono perciò utilizzati qualche anno fa per la cura del cancro, per la depilazione, ecc. Ma oggi tali cure si eseguiscono meglio con le sostanze radioattive, di uso più comodo e di azione più regolabile (§ 215). L'azione dei raggi *X* sulla pelle si spiega pensando al calore, che si svolge nell'interno dei tessuti animali per l'assorbimento dei raggi *X*. Il dottore americano Whitney è riuscito recentemente con questo mezzo, ad elevare la temperatura del corpo degli animali e a produrre una *febbre elettrica*, che può essere utilissima per la cura di alcune malattie; come, ad es., la febbre malarica.

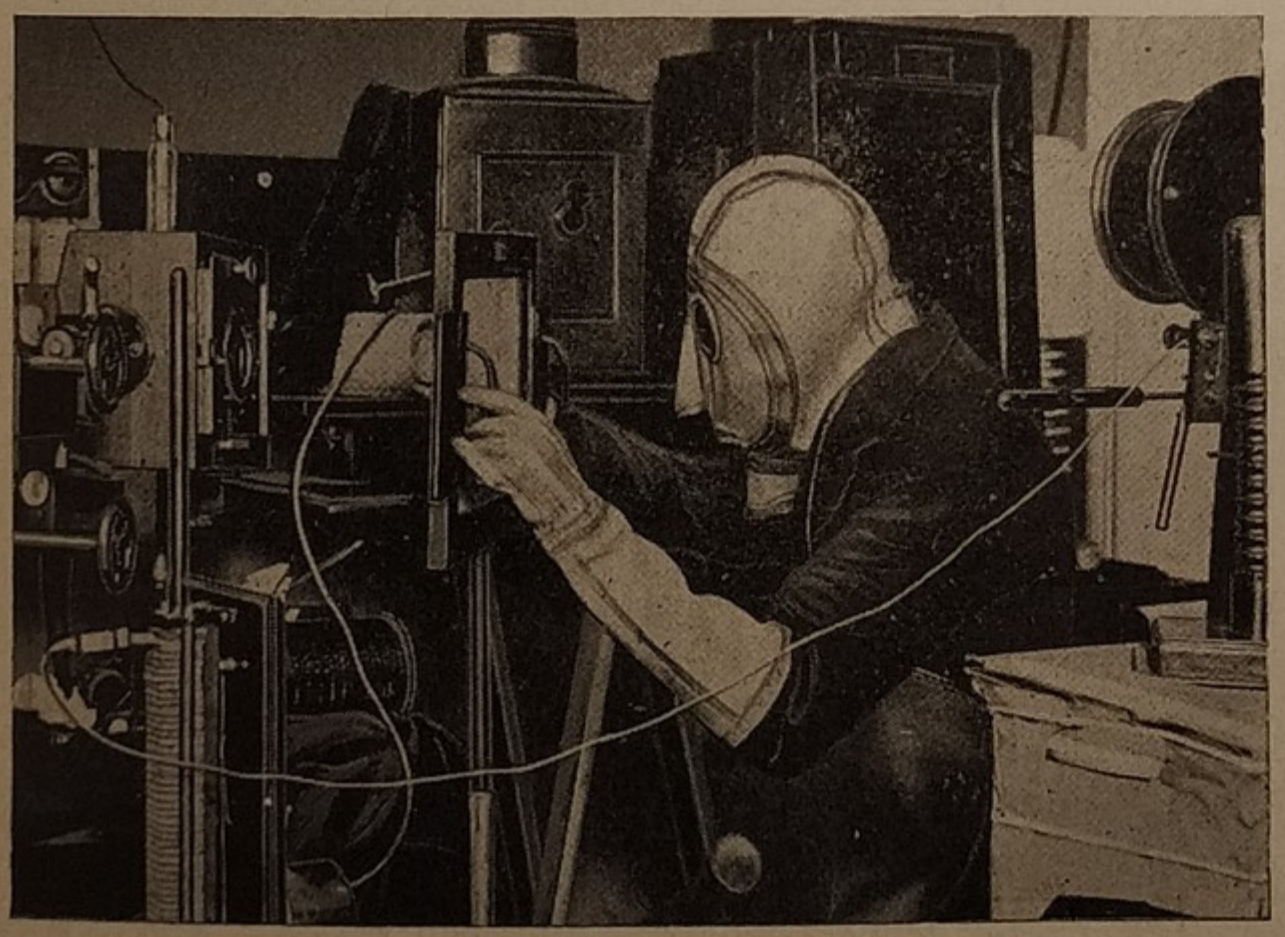


Fig. 344.

L'azione dei raggi *X* può essere così energica, da produrre la caduta dei capelli e piaghe inguaribili sulle persone che si espongono ripetutamente

a tali radiazioni. Perciò i tecnici che adoperano a lungo la fluoroscopia, si ricoprono la testa e le mani con tessuti contenenti lamine di piombo, opache ai raggi X, (Fig.344).

Per le applicazioni industriali, si è da pochi anni creata una nuova tecnica, **la radiometallografia,** che permette di svelare la struttura interna e quindi la qualità di un pezzo di metallo, o di un organo di una macchina, o la costituzione di una lega, ecc.; la Fig.345 riproduce la radiografia di un pezzo di aeroplano, con un giunto nascosto e proibito. Coi raggi X si scoprono le perle e le gemme false, le quali essendo costituite da impasti o da vetri amorfi, mostrano ombre più dense che quelle vere.

Fig. 345.

Con la scoperta sensazionale del Laue (§ 208), non solo si riuscì a provare la natura ondulatoria dei raggi X; ma è stato raggiunto il mezzo per esplorare la composizione interna dei cristalli, e la disposizione degli atomi degli elementi che li costituiscono. Inoltre si è riusciti a provare la struttura cristallina di sostanze, per le quali la cristallografia non la supponeva neanche; e così ci si rese conto della quasi universalità della struttura cristallina del mondo minerale. Per questa via si arrivò perfino alla determinazione del *diametro degli atomi*; e si trovò, p. es., che esso è di $1{,}54 \times 10^{-8}$ cm. per l'atomo di carbonio, $0{,}84 \times 10^{-8}$ cm. per quello del magnesio, di $3{,}8 \times 10^{-8}$ cm. per quello di piombo, ecc.

213. **Effetto fotoelettrico.** — In alcuni metalli, il cui atomo è suscettibile di più facile disintegrazione, l'emissione di elettroni può provocarsi anche con energia minore di quella calorifica, impiegata nell'effetto termoionico; e cioè con l'energia luminosa. Ciò avviene, ad es., col sodio, col potassio, col rubidio, ecc. Questo fenomeno è stato chiamato **effetto fotoelettrico, o effetto Hertz.**

Se nell'ampolla della Fig. 341 supponiamo che F sia un pezzettino di potassio tenuto nell'oscurità, e ad un certo istante facciamo cadere su di esso qualche raggio di luce, si produce un'emissione di elettroni verso P, e quindi anche ora un passaggio di elettricità. L'emissione di elettroni avviene nello stesso istante in cui la luce agisce, e si arresta immediatamente non appena essa cessi di colpire la superficie del potassio.

Vedremo in seguito (§ 367-368) l'applicazione di questo fenomeno alla **televisione,** al **cinema sonoro,** ecc.

Radioattività.

214. **Radio.** — Appena avvenuta la scoperta di Röntgen, alcuni fisici ricercarono se fenomeni simili si potevano ottenere dalle sostanze fosforescenti. Il Becquerel [1] scoprì che alcuni sali di *uranio* emettono *spontaneamente*, cioè senza bisogno di scariche elettriche, radiazioni analoghe a quelle studiate nel capitolo precedente.

I coniugi Curie [2] da altre osservazioni furono indotti a ritenere, che questa proprietà fosse dovuta a piccolissime quantità di una sostanza nuova contenuta nei minerali di uranio; con pazienti ricerche nel 1898 riuscirono ad isolare da circa una tonnellata di *pechblenda* (minerale contenente l'uranio) dodici centigrammi di cloruro di un nuovo elemento, a cui dettero il nome di **radio,** il cui peso atomico è molto elevato (226,5).

La medesima proprietà fu scoperta nel torio ed in altri nuovi elementi, che si chiamarono **polonio** ed **attinio**; tutti questi corpi si chiamano **radioattivi.**

215. **I raggi dei corpi radioattivi - Emanazione.** — I corpi radioattivi presentano complessivamente tutti i fenomeni osservati con le scariche nei gas rarefatti; cioè producono fosforescenza, calore, impressionano la lastra fotografica, ionizzano i gas, ecc. Per l'ionizzazione dei gas, rendono conduttrice l'aria attorno ad un corpo elettrizzato, e questo si scarica rapidamente. Per tale proprietà, dal tempo in cui si scarica un elettroscopio elettrizzato, se in vicinanza si espone una sostanza radioattiva, si riconosce e si misura il grado di radioattività di questa. Questo metodo è estremamente sensibile; esso permette di riconoscere la presenza di $^1/_{50\,000\,000}$ di milligrammo di radio.

I corpi radioattivi hanno azione eccitante e cauterizzante sui tessuti animali. L'azione energica del radio sulla pelle produce infiammazione e piaghe difficili a guarire; mentre un'azione più moderata è impiegata per la cura di alcune malattie, come il *lupus*, il *cancro*, ecc., (**radioterapia**). Il dott. Stoklasa, boemo, preconizza l'uso del radio per la rigenerazione delle cellule, trasformate per la vecchiaia, e quindi il prolungamento della giovinezza.

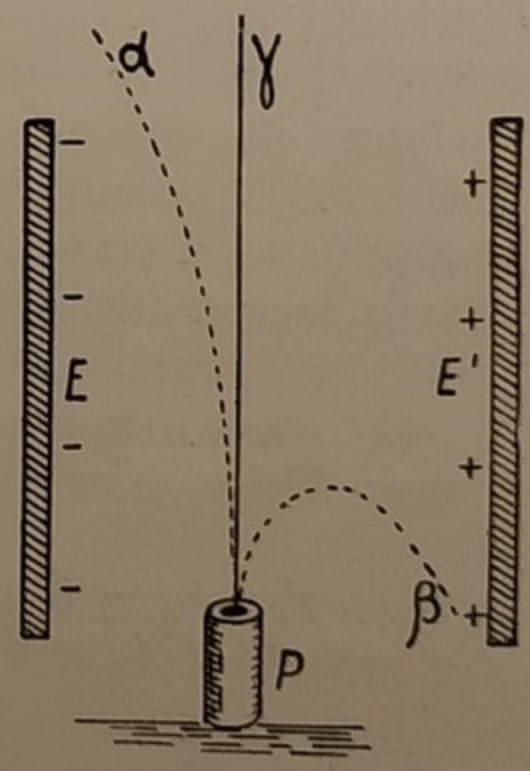


Fig. 346.

Al fondo di un cilindretto di piombo P (Fig. 346) si ponga qualche granello di sale di radio, e si disponga il cilindretto tra due lastre E ed E' elettrizzate di segno contrario. Le radiazioni provenienti dal radio, si comportano in tre modi diversi:

1. Una specie di radiazioni è poco deviata, verso l'elettrodo E elettrizzato negativamente. Sono i **raggi** α, dovuti a corpuscoli elettrizzati di

---

(1) Becquerel Antoine-Henri; n. a Parigi nel 1852, m. in Bretagna nel 1908.
(2) Curie Pierre; n. a Parigi nel 1859; m. ivi nel 1906. — Curie madame, nata Sklodowska; n. a Varsavia nel 1867, m. a Parigi nel 1934.

segno contrario ad E, cioè positivamente. Con lo stesso procedimento adottato per gli elettroni (§ 206), si è trovato che la massa di tali corpuscoli è quadrupla di quella dell'atomo di idrogeno, cioè quanto la massa di un *atomo di elio*, e che la loro carica (positiva) è doppia di quella (negativa) di un elettrone; la loro velocità varia da 14000 a 22000 km. al secondo. Queste radiazioni hanno tutte le proprietà dei *raggi anodici*, (§ 207).

2. Un'altra specie di radiazioni è più deviata delle precedenti verso l'elettrodo E' elettrizzato positivamente. Sono i **raggi** β, formati da corpuscoli elettrizzati di segno contrario ad E', cioè negativamente. Col solito procedimento si è riscontrato che si tratta di corpuscoli aventi massa, carica, e velocità eguali a quelle degli elettroni. Queste radiazioni hanno tutte le proprietà dei *raggi catodici*, (§ 205).

3. Una terza specie di radiazioni non è deviata nè verso E, nè verso E', sono i **raggi** γ, senza carica elettrica, che si comportano come i *raggi X*; prodotti dall'urto delle particelle β contro gli atomi radioattivi vicini. Hanno una lunghezza d'onda ancora più piccola dei raggi X (con frequenza sino a 500 quintilioni al secondo), e sono più penetranti di questi; potendo attraversare forti spessori di acciaio e percorrere anche 800 m. nell'aria prima di arrestarsi.

I raggi α colpendo uno schermo spalmato di solfuro di zinco, lo illuminano ora in un punto ora in un altro, e lo schermo assume l'apparenza di un cielo stellato scintillante (**spintariscopio di Crookes**).

L'insieme delle particelle α costituisce una specie di gas molto rarefatto, fortemente radioattivo, che si è potuto isolare e si chiama **la emanazione**, o anche **radon.** La radioattività dell'emanazione però dura poco; essa è ridotta a metà dopo circa 4 giorni, e s'indebolisce col tempo fino ad annullarsi; ma allora *l'emanazione si è trasformata in elio* (§ 226), il cui volume è triplo di quello dell'emanazione scomparsa. Un grammo di radio produce 156 mm^3 di elio per ogni anno.

Questi fenomeni provano che l'*atomo di radio si scompone in atomi di emanazione, e questi a loro volta si trasformano in atomi di elio*. Anzi è stata provata una più generale *disintegrazione*; cioè un corpo radioattivo emettendo la propria radiazione, si trasforma in un altro corpo, che a sua volta si trasforma in un altro, e così via; fino ad ottenersi *il piombo*, che è l'elemento finale, non più disgregabile, di questa scala di elementi.

216. **Energia interatomica.** — I fatti precedenti, di importanza teorica grandissima, infirmano l'ipotesi atomica sulla costituzione della materia, che per un secolo è apparsa una delle teorie fondamentali, tra le più verosimili e le più accettabili della Scienza. Oggi non si può più ammettere che l'atomo sia la parte più piccola, indivisibile, della materia; poichè non potremmo più spiegare come dal radio, corpo semplice, possa derivare l'elio, pure esso corpo semplice. Dobbiamo ora ritenere che l'atomo sia un aggregato di elettroni, variabili per numero e per disposizione da un elemento all'altro. La disgregazione di un atomo nei suoi elettroni può dar luogo a diverso aggruppamento di questi, in modo da formare *nuovi atomi* di specie diversa dal primo. Appare pertanto possibile la trasformazione di un elemento di peso atomico maggiore in un altro di peso atomico minore; ed il sogno degli antichi alchimisti di trasformare un corpo comune in oro,

non appare più una aspirazione insensata. Ma su questo argomento daremo un cenno più chiaro nel capitolo seguente.

La forza viva (Vol. 1° - § 113) delle piccole masse, lanciate con enorme velocità nelle radiazioni radioattive, è fonte di energia: essa ci si manifesta comunemente sotto forma di calore. Infatti, una sostanza radioattiva è permanentemente a temperatura di qualche grado superiore a quella dell'ambiente; si è trovato che da un grammo di bromuro di radio si svolgono circa 135 piccole calorie all'ora, senza ch'essa diminuisca sensibilmente di peso.

Tale energia è enorme; e può valutarsi essere un milione di volte più grande di quella svolta, a parità di peso, nelle combinazioni chimiche più energiche. Si pensi inoltre che la radioattività di alcune sostanze perdura per migliaia di anni; onde l'energia totale estrinsecata per tanto tempo dalla disintegrazione atomica, risulta davvero grandissima. L'energia totale emessa dalla trasformazione completa di un grammo di radio in elio e piombo, è di $3{,}7 \times 10^9$ calorie; cioè tanto calore quanto può fornirne la combustione di 500 kg. di carbone; oppure, in modo più chiaro, tanta energia quanta basterebbe per sollevare all'altezza di 34 metri un transatlantico di 50000 tonnellate! Si prevede quale nuova ed immensa fonte da sfruttare in avvenire sarà questa energia interatomica, allorchè avremo trovato il modo di provocare la disintegrazione degli atomi a nostra volontà e con grande rapidità; mentre ora assistiamo solo passivamente al prodursi di fenomeni, che avvengono lentamente e spontaneamente, senza che noi sappiamo come, e senza che possiamo nè accelerare, nè ritardare.

Costituzione della materia.

217. **La teoria atomica.** — L'ipotesi dell'atomo indivisibile quale ultima particella costitutiva dei corpi, base della Chimica, non è tanto recente come può supporsi. L'atomo, già divinato dagli antichi filosofi greci Eraclito, Democrito, ecc., fu meglio concepito da Bacone, Cartesio, Newton; ma è con Lavoisier, Dalton, Avogadro, fondatori della Chimica, che l'**ipotesi atomica** fu imposta ed accettata, per tutto il secolo scorso, come una delle concezioni più sicure della scienza. Con l'aggruppamento degli atomi eguali o diversi, in molecole, si spiegava la costituzione di tutti gli innumerevoli corpi, semplici o composti, che costituiscono la Natura; mentre i fenomeni della dilatabilità, compressibilità, solubilità, ecc., rendevano inoppugnabile l'ipotesi della discontinuità e della **costituzione granulare della materia,** (Vol. 1° - 14).

S'affacciò subito il problema della determinazione del peso degli atomi. Al principio del secolo scorso, non era possibile determinare la dimensione ed il peso reale di ciascun atomo; ma si potè determinate il **peso atomico relativo**; cioè il rapporto tra il peso atomico di un dato elemento ed il peso atomico dell'idrogeno preso eguale ad 1; e tutti i trattati di Chimica portano la tabella dei pesi atomici dei 90 elementi oggi conosciuti.

Il Prout [1] nel 1815, affacciò l'ipotesi che gli atomi dei varî elementi fossero aggregati di atomi di idrogeno, non disgregabili coi mezzi fisici e

(1) Prout William; n. in Inghilterra nel 1786, m. a Londra nel 1850.

chimici allora noti. Ma tale ipotesi fu allora scartata, allorchè con misure più precise si potè accertare che i pesi atomici dei varî elementi non sono multipli di quello dell'idrogeno; mentre vedremo in seguito (§ 222), come oggi essa ritorna in vigore.

La classificazione periodica di Mendeleieff (1869), ci indusse a ritenere che le proprietà degli elementi non dipendevano da una distribuzione casuale; poichè tali proprietà si riproducevano periodicamente, distribuendo gli elementi in gruppi di 8 ciascuno. Ciò indusse a pensare che i corpi semplici non sono sostanze assolutamente diverse e distinte; ma i loro atomi sono dei sistemi complessi tra cui esistono relazioni di composizione.

Le leggi di Raoult[1] (1884) sulle soluzioni (Vol. 1° - §§ 283 e 296), indussero il Van't Hoff ad ammettere che le molecole dei corpi sciolti in un liquido, si comportassero come se fossero allo stato gassoso; e le leggi sulla pressione osmotica (Vol. 1° - § 217), confermavano tale ipotesi.

I fenomeni della diffusione, della diosmosi, della dialisi (Vol. 1° - § 212), ci indussero a considerare le molecole dei corpi in perenne e velocissimo movimento; vedemmo in *Termologia* (Vol. 1° - § 318), come nei gas la pressione sia dovuta all'urto delle molecole contro le pareti del recipiente. Il moto molecolare del resto è stato reso visibile dal Brown, il quale con la disposizione *ultramicroscopica* (§ 71), riuscì ad osservare, se non proprio il movimento delle singole molecole, almeno il moto risultante degli urti di esse contro corpuscoli sospesi in un fluido. Onde l'immobilità, che sembra la caratteristica di un fluido in quiete, è solo apparente ed è un'illusione dovuta all'imperfezione dei nostri sensi; mentre la materia è in perenne fremito ed il movimento è la legge generale che governa l'Universo, tanto sulle immense moli degli astri, come nelle minime particelle che costituiscono la materia.

218. **Il numero di Avogadro.** — Ma tutto questo non era ancora sufficiente per determinare la grandezza effettiva delle molecole. Parecchi scienziati volsero i loro studi a determinare il numero delle molecole contenute in una data massa di sostanza. O meglio fu determinato il numero di molecole contenuto in una *molecola-grammo* di sostanza (Vol. 1° - § 319); esso è chiamato il **numero di Avogadro,** ed è stato dedotto con buona approssimazione mediante numerose esperienze, basate su molti fenomeni della Chimica e della Fisica. Il suo valore è stato calcolato in:

$$N = 60{,}6 \times 10^{22}.$$

Sono adunque più di 600 sestilioni di molecole, che turbinano in una molecola-grammo di sostanza, muovendosi in tutti i sensi, con velocità di parecchie centinaia di metri al secondo, urtandosi tra loro un centinaio di migliaia di volte per ogni centimetro di percorso. Si è pure trovato (Vol. 1° - § 319) che il diametro delle molecole è di qualche decimilionesimo di mm; ad es., quello della molecola dell'argon è di $2{,}85 \times 10^{-8}$ cm; e la loro massa è di qualche settimilionesimo di grammo, (massa della molecola di ossigeno: $m = g.\ 5{,}3 \times 10^{-23}$).

---

(1) Raoult François, chimico dell'Univ. di Grenoble; n. a Fournes nel 1830, m. a Grenoble nel 1901.

219. **Costituzione granulare della materia.** — Tali risultati ci hanno indotto a considerare le molecole ben distanti tra loro; a distanze cioè rilevanti rispetto alla loro grandezza. Concepiamo così i corpi come costituiti di un pulviscolo di radissime particelle, eppure in numero straordinariamente grande, fluttuanti in uno spazio enorme rispetto alle loro dimensioni, che si muovono come palle di cannone, cambiando rotta dopo qualche milionesimo di centimetro di percorso. L'energia derivante da questo moto è immensa, (l'energia cinetica di una molecola a 0° è di $0{,}56 \times 10^{-13}$ erg; Vol. 1° - § 320). Dalla considerazione del calore specifico dei gas, abbiamo pure dedotto che le molecole dei gas monoatomici non ruotano; esse sono da considerare come sferette elastiche *lisce*, incapaci con l'urto di trasmettersi moti di rotazione; mentre le molecole dei gas poliatomici devono ritenersi dotate di moti rotatori, (Vol. 1 - § 320).

Questi risultati sulla conoscenza della struttura molecolare dei corpi, sono davvero meravigliosi; essi confermano la grande importanza del moto di Brown, che fu il primo fenomeno che portò in modo tangibile alla scala delle grandezze percettibili dall'uomo, il mondo molecolare e la reale sua discontinuità, asserita dalle leggi chimiche sulle combinazioni.

Quindi alla fine del secolo scorso non v'era alcuno che osasse confutare la costituzione granulare della materia, formata da aggregati di molecole in rapido moto, e l'ipotesi atomica ad essa connessa per la costituzione delle molecole.

220. **L'atomo elettrico.** — Tutto quanto s'è riportato nei paragrafi precedenti è roba del secolo scorso; ed il nostro secolo ha ereditato i concetti già ribaditi di *molecola* e di *atomo*, sui quali nessuno pensava di sollevare dubbio alcuno. I nuovi studi iniziati alla fine del secolo scorso, hanno preso un indirizzo diverso; essi tendevano alla conoscenza dell'atomo.

La scoperta dei raggi catodici ci indusse ad ammettere l'esistenza degli *elettroni*, cioè di particelle assai più piccole degli atomi, elettrizzate negativamente. Un insieme di elettroni non forma alcuna sostanza chimica, non è cioè materia; tuttavia esiste fisicamente, ed era stato divinato fin dal 1886 dal Crookes, che lo aveva chiamato *il quarto stato ultragassoso della materia*, o *la materia radiante*.

La carica elettrica portata da un elettrone, la velocità e la massa di questo, sono state valutate con esperienze abbastanza semplici. Come è noto, un proiettile uscente dalla canna di un fucile diretta orizzontalmente, non segue una traiettoria rettilinea; ma una parabola, per l'attrazione dovuta alla gravità. Il proiettile colpisce un piano orizzontale in un punto più o meno lontano, a secondo della velocità di cui è animato; questa quindi può dedursi misurando la distanza del punto colpito.

La deviazione dalla traiettoria rettilinea si osserva pure negli elettroni, allorchè si muovono in un campo elettrostatico (§ 215); la deviazione dipende dall'intensità della forza elettrica agente, dalla massa dell'elettrone, dalla sua velocità, e dalla carica da esso posseduta. Il valore della carica, determinato da Millikan (1908) per altra via, fu trovato di $1{,}59 \times 10^{-19}$ *coulomb* (§ 252); si è ricavata la massa dell'elettrone (1) eguale a $0{,}9 \times 10^{-27}$

(1) S'intende di un elettrone in quiete. Secondo la Teoria di Einstein, la massa di un corpo varierebbe con la velocità di esso.

grammi, cioè 1840 volte più piccola di quella dell'atomo d'idrogeno; il raggio dell'elettrone, supposto sferico, è di $1{,}8 \times 10^{-13}$ cm. Un elettrone cioè è così piccolo, che *esso è rispetto a un granello di sabbia, quel che è il granello di sabbia rispetto alla Terra.*

L'elettrone è adunque una particella il cui raggio è 50000 volte più piccolo di quello dell'atomo di qualsiasi elemento; ossia, pressapoco, il raggio dell'elettrone sta al raggio di un atomo, come il raggio della Terra sta al raggio della sua orbita attorno al Sole; o anche, come 120 m. stanno al raggio della Terra.

Infine s'è calcolata la velocità dell'elettrone; essa è variabile secondo il modo con cui questo è emesso (§ 206), e può raggiungere valori prossimi alla velocità della luce.

L'esistenza degli elettroni scaturisce anche dall'effetto termoionico (§ 211), dai fenomeni radioattivi (§ 215), dalla rifrazione della luce, e da altri fatti ancora; ed in ogni caso l'elettrone è sempre identico, è unico. Esso è quindi un'unità fisica ben determinata; è un corpuscolo che entra nella costituzione di tutti i corpi; ma possiede una proprietà che non era prevista nei secoli passati, allorchè si pensava ad un costituente universale della materia: *esso è elettrizzato.*

La carica elettrica posseduta dall'elettrone è la più piccola quantità di elettricità che si trovi isolata; essa è l'**atomo di elettricità.** Ogni altra carica elettrica dovrà essere perciò un multiplo di quella.

221. **I raggi anodici.** — Con la scoperta dei raggi anodici o **raggi-canale** (§ 207), fatta dal Goldstein [1] nel 1886, i quali vengono deviati in un campo elettrico in senso opposto ai raggi catodici, fu provata l'esistenza di particelle cariche di elettricità positiva. Ma la loro velocità è solo di qualche migliaio di km. al s., cioè assai minore di quella degli elettroni; mentre la massa ne è assai maggiore, cioè dell'ordine di grandezza degli atomi. Si tratta quindi di particelle fondamentalmente diverse dagli elettroni, più lente assai di queste e quindi poco penetranti. Il loro tragitto nell'aria alla pressione normale, è di pochi centimetri; il minimo ostacolo solido le ferma.

La deviazione di queste particelle in un campo elettrico dipende dalla massa di esse, e quindi è diversa secondo la natura dell'atomo elettrizzato che le costituisce, e cioè da un elemento all'altro. Abbiamo così un nuovo metodo di analisi dei corpi semplici, che è molto sensibile, e permette di calcolare i pesi atomici con l'approssimazione di un millesimo.

222. **Isotopismo.** — Orbene, applicando il metodo precedente allo studio del *neon atmosferico*, Aston [2] (1913) trovò che in esso si riscontrano per i raggi anodici due deviazioni diverse: cioè vi sono *due atomi diversi* nella costituzione del gas. Quindi il neon atmosferico è il miscuglio di due neon alquanto diversi; che però non si è riusciti ad isolare coi mezzi chimici e fisici di cui disponiamo. Questo fenomeno è stato riscontrato in parecchi altri elementi; e ci conduce ad ammettere che un gran numero di corpi,

---

(1) Goldstein Eugen; n. a Gleiwitz nel 1850.

(2) Aston Francis; fisico inglese vivente, dell'Università di Cambridge n. a Birmingham nel 1877.

considerati semplici, sono in realtà formati dal miscuglio di due o più corpi costituenti, chiamati *isotopi*, di peso atomico un po' diverso, ma aventi proprietà fisiche e chimiche talmente simili, da non potersi separare. Questo fatto spiega come il peso atomico di alcuni elementi sia un numero frazionario, anzichè un numero intero; così *il peso atomico del neon è 20,20, perchè l'atomo del neon contiene due isotopi rispettivamente del peso atomico 20 e 22.*

Tale fatto importantissimo rimette in auge la teoria già enunciata dal Prout (§ 217), secondo cui gli atomi dei diversi elementi sono tutti formati dall'aggregazione di atomi di una specie sola, e cioè di atomi di idrogeno; infatti, tenuto conto dell'isotopismo, si trova ora che i pesi atomici dei varî elementi sono veramente multipli del peso atomico dell'idrogeno.

L'atomo di idrogeno sarebbe perciò il costituente unico di tutti i corpi, il mattone fondamentale ed universale della materia. Vedremo come ciò è confermato da altri fatti, (§ 229).

Sono stati scoperti due (e forse tre) isotopi dell'idrogeno; un isotopo, chiamato *deuterio*, ha massa doppia cioè peso atomico 2, e con l'ossigeno forma un'acqua speciale, chiamata *acqua pesante*, che pare si ritrovi nell'organismo umano nei periodi di malattia o nei vecchi.

223. **Il protone - Il positrone.- Il neutrone - Il fotone.** — Ma d'altra parte, da dove provengono gli elettroni liberi dei raggi catodici e dei corpi radioattivi? Eccoci nella necessità di ammettere che essi facciano parte della costituzione dell'atomo. Si affaccia così l'ipotesi che l'atomo sia costituito da **un nucleo** elettrizzato positivamente, attorno a cui sono disposti uno o più elettroni. Se la carica positiva del nucleo è eguale in valore assoluto a quella totale degli elettroni che gli stanno attorno, l'atomo che ne risulta è elettricamente neutro.

L'atomo d'idrogeno, come vedremo in seguito, è il più semplice di tutti; ed è *costituito da un nucleo e da* **un solo** *elettrone*. La carica positiva del nucleo in tal caso deve essere eguale a quella dell'elettrone; cioè $1{,}59 \times 10^{-19}$ coulomb (§ 220), ed è quindi la più piccola carica positiva che si può immaginare isolata. Il nucleo dell'idrogeno si chiama **protone**.

Si era pensato che la carica positiva del protone si potesse scindere dal nucleo, formando una cosa a sè, cioè un *elettrone positivo*, che fu chiamato **positrone**. Tuttavia non si era riusciti a dimostrare l'esistenza del positrone libero, cioè staccato dal nucleo. Ma nel marzo 1933 i fisici Blackett (inglese) e Occhialini (italiano) dell'Università di Cambridge, provarono l'esistenza dei positroni liberi. Tale esistenza però è effimera, appena per la durata di qualche milionesimo di secondo; perchè nel suo brevissimo viaggio il positrone s'incontra e si unisce con un elettrone, e perciò scompare come individuo a sè. L'unione di un positrone con un elettrone non forma materia, poichè come tale non possiamo considerare (nel senso ordinario) nè l'uno nè l'altro. Ma l'energia da essi posseduta non si distrugge; insieme formano un centro di irradiazione di energia, che è l'origine delle radiazioni studiate (luce, calore, ecc.). Tal centro di energia si chiama il **fotone**.

Il protone, privo del positrone, forma il più piccolo nucleo di materia *neutra* (non elettrizzata); si chiama il **neutrone**. Altri invece, concepiscono il neutrone come il risultato di un protone la cui carica positiva è neutralizzata dall'aggiunta di un elettrone.

224. **Gli ioni.** — In determinate condizioni o sotto alcune influenze, l'atomo neutro può perdere uno o più elettroni; allora quel che rimane è elettrizzato positivamente e forma **un ione positivo**; oppure può acquistare uno o più elettroni supplementari e si elettrizza negativamente, formando **un ione negativo.** Sono questi ioni che attratti da due elettrodi a potenziale diverso, e cioè gli uni dall'elettrodo negativo, gli altri da quello positivo, cedono ad essi le loro cariche e producono il passaggio dell'elettricità; si produce così la scarica elettrica.

In un mezzo perfettamente isolante (cioè nel vuoto assoluto) non esistono ioni, e la scarica non può prodursi; mentre un mezzo (un gas) è tanto più conduttore, quanto maggiore è il numero degli ioni che contiene, e quanto maggiore è la velocità con cui questi si muovono. Questo moto essendo prodotto dall'attrazione degli elettrodi fra cui avviene la scarica, la velocità degli ioni dipende dalla differenza di potenziale di tali elettrodi.

In un gas rarefatto gli ioni, attratti dagli elettrodi, possono muoversi più liberamente, per lunghi tratti, prima di urtare qualche molecola del gas; acquistano perciò velocità più grande, tale da spezzare più facilmente la molecola urtata, che così si scinde in due nuovi ioni. Per questo i gas rarefatti sono più ionizzati, e quindi più conduttori, (§ 204).

Se però la rarefazione è molto spinta, per quanto gli ioni acquistino grandi velocità, essendo pochissime le molecole che incontrano nel loro cammino, si formano pochissimi ioni nuovi, e la conducibilità diminuisce; perciò, come sappiamo (§ 204), con la rarefazione la conducibilità dapprima cresce, fino a un massimo, e poi diminuisce.

Cause che possono ionizzare le molecole, cioè strappare ad alcune di esse uno o più elettroni, sono i raggi ultravioletti, i raggi catodici, i raggi X, la radioattività, l'incandescenza e la combustione, ecc.

225. **Come si formano le molecole.** — Degli atomi dei varî elementi alcuni possono perdere facilmente elettroni, formando ioni positivi: sono **i metalli** (nel senso chimico); altri hanno invece tendenza a captare elettroni, formando ioni negativi: sono i **metalloidi.** Gli atomi dei metalli sono monovalenti, bivalenti, ecc., secondo che perdono uno, due..., elettroni; in modo analogo si spiega la valenza degli atomi dei metalloidi, secondo che possono assorbire uno, due..., elettroni.

Ciò posto, poniamo in presenza, ad es., un atomo neutro di potassio K, ed un atomo neutro di cloro Cl; avviene che l'atomo di K perde un elettrone, rimanendo un ione positivo K^+ e l'elettrone perduto è preso dall'atomo Cl che diventa un ione negativo Cl^-. Questi due ioni elettrizzati di segno contrario si attraggono, si uniscono, e formano la molecola *neutra* KCl del cloruro di potassio. L'affinità chimica quindi sarebbe un fenomeno elettrico.

226. **La radioattività.** — Da quanto s'è detto avanti, non risulta qual'è la posizione reciproca del nucleo e degli elettroni nell'atomo. Sono i fenomeni radioattivi che specialmente ci hanno fornito idee più chiare sulla costituzione dell'atomo.

Fu intanto riconosciuto che la radioattività è una proprietà dell'atomo. Sia esso libero o combinato, si trovi allo stato solido, liquido o gassoso,

i raggi caratteristici dell'elemento sono emessi in quantità proporzionale alla quantità di esso e non sono influenzati nè dallo stato di combinazione, nè dallo stato fisico in cui si trova. Sottoposto un pezzo di sostanza radioattiva ai più potenti agenti, cioè alle temperature più elevate, ai freddi più rigidi, a forti campi elettrici, alle più potenti calamite, a luce intensissima, ecc., mai in ogni caso la radioattività presentò sensibile variazione. Nello spintariscopio di Crookes (§ 215), poichè ogni punto luminoso si accende per l'urto di una particella α contro il solfuro di zinco, contando il numero delle scintillazioni e misurando la quantità totale di elettricità portata nello stesso tempo sullo schermo dello spintariscopio, si è calcolato quant'è la carica elettrica portata da ogni singola particella α. Si è trovato che essa è doppia di quella di un elettrone (§ 215); cioè di $3{,}19 \times 10^{-19}$ coulomb.

Con metodo analogo a quello adottato per l'elettrone, si è misurata la massa di queste particelle, e si è trovata 4 volte maggiore di quella dell'atomo di idrogeno. Ciò ha fatto concludere che ogni particella α è costituita da un nucleo di 4 protoni (§ 223), attorno a cui sono disposti 2 elettroni. Le due cariche elementari negative di questi elettroni, neutralizzano due delle quattro cariche elementari positive dei quattro protoni del nucleo; restano le altre due cariche positive, che costituiscono la carica posseduta dalla particella α. Se al nucleo della particella α si aggregano altri due elettroni, si neutralizzano le altre due cariche elementari positive del nucleo e la particella diventa neutra; ma allora essa *diventa un atomo di elio*; cioè una particella α aggregandosi due elettroni, forma un atomo di elio. Questo dunque è formato da un nucleo di 4 protoni, a cui sono attaccati 2 elettroni (detti **nucleari**); attorno a tale nucleo si muovono altri 2 elettroni periferici, (§ 231). Si può anche dire che il nucleo è formato da due protoni e due neutroni.

Nel modo ora detto spieghiamo come il radio si trasformi in elio.

Il numero delle particelle α emesse dalle sostanze radioattive, è enorme; *un grammo di radio emette 136 miliardi di particelle al secondo*. D'altra parte, poichè si può contare con lo spintariscopio il numero delle particelle α emesse in un dato tempo, si può così conoscere il numero degli atomi di elio che ne derivano; e poichè si può misurare il volume occupato da questo gas, ecco un nuovo metodo per calcolare il numero di Avogadro. Con tale procedimento si è trovato lo stesso numero dedotto con gli altri metodi accennati avanti; meravigliosa concordanza fra i risultati che la scienza ritrova percorrendo vie diversissime.

I raggi β invece sono costituiti da elettroni emessi dall'atomo di radio. La perdita di un elettrone non produce nell'atomo una diminuzione di peso apprezzabile; si pensi alla piccolezza della massa dell'elettrone, che perciò non abbiamo considerato come materia. Tuttavia l'atomo residuo è affatto diverso da quello primitivo. L'esplosione dell'atomo non avviene per tutti gli atomi della sostanza radioattiva; su un milione di atomi di radio, se ne disgrega appena uno per giorno. Così si comprende come la radioattività del radio possa durare 2500 anni, e quella dell'uranio sino a 8 miliardi di anni!

227. **L'atomo nucleare di Rutherford.** — Ed eccoci al momento di raccogliere le fila e di vedere come tutte le nozioni raccolte, ci permettano di arrivare a comprendere come sia fatto l'atomo.

Come possiamo spiegare che le particelle α attraversino uno spazio pieno d'aria, e che gli elettroni passino attraverso il vetro, l'alluminio, ecc.? Non certamente passando fra gli spazi intermolecolari ed interatomici; perchè non si può ammettere che la traiettoria rettilinea di questi corpuscoli si estenda esclusivamente per questi spazi vuoti, senza urtare alcun atomo che le arresti. È necessario pertanto pensare che tali corpuscoli *attraversino gli atomi*; ed eccoci quindi costretti a ritenere che l'atomo non sia quel corpuscolo unico, indivisibile, rigido ed impenetrabile, che si era concepito nel secolo passato. Dobbiamo invece pensare che esso sia un sistema comprendente delle lacune, nelle quali raggi α e β possano agevolmente penetrare. E poichè si è osservato che nell'attraversare l'atomo le particelle α vengono talvolta deviate dal loro cammino rettilineo, si è pensato che ciò avvenisse perchè in un punto dell'atomo esistevano cariche positive, capaci di respingere e far deviare le particelle α, anch'esse elettrizzate positivamente.

Con tali considerazioni il Rutherford [1] arrivò alla concezione, che l'atomo sia formato da **un nucleo** centrale su cui è concentrata la carica positiva, attorno a cui si librano gli elettroni, in una regione relativamente grande, che corrisponde al volume di tutto l'atomo. Il diametro del nucleo è piccolissimo; appena $^1/_{5000}$ e anche meno del diametro dell'atomo: cioè il nucleo rispetto all'atomo è come un granello di sabbia rispetto ad un automobile! È perfino assai minore del diametro degli elettroni; il nucleo dell'atomo di idrogeno non ha che un diametro di $^1/_{1840}$ rispetto a quello dell'elettrone. Essendo tutta la massa dell'atomo concentrata nel nucleo così piccolo, si immagini quanto enorme deve essere la densità di questo; immensamente grande rispetto alle densità dei corpi che conosciamo!

Gli elettroni nell'atomo non potranno evidentemente essere immobili, perchè attratti dal nucleo vi si attaccherebbero; essi quindi devono essere animati da rapida rotazione attorno al nucleo, e sfuggono all'attrazione di questo per la stessa ragione che i pianeti girando attorno al Sole non vi cadono, sebbene da esso attratti.

Il complesso dell'atomo va dunque concepito come un sistema solare in miniatura, in cui il Sole è rappresentato dal nucleo positivo di dimensioni piccolissime ma di massa enorme (relativamente agli elettroni), e i pianeti sono gli elettroni che gli turbinano attorno; con la differenza però che gli elettroni sono tutti eguali tra loro, mentre i pianeti non lo sono. Essendo la massa degli elettroni trascurabile, la massa del nucleo (eguale a quella di tutto l'atomo) è invece variabile da un elemento all'altro. Sappiamo di già che la carica positiva del nucleo varia da un elemento all'altro; ma essa è sempre un multiplo della carica dell'elettrone. Cioè è un multiplo di una carica elementare positiva (*il positrone*), che è la più piccola carica che si può concepire isolata, ma che a differenza dell'elettrone, esiste solamente unita al nucleo che la porta; essa si chiama **un quanto d'elettricità.** Quindi il *nucleo dell'atomo possiede un certo numero intero di quanti d'elettricità.*

---

(1) Rutherford Ernesto, fisico inglese vivente; n. a Nelson nel 1871.

228. **Il numero atomico.** — Essendo l'atomo un complesso elettricamente neutro, attorno al nucleo devono muoversi tanti elettroni da formare una carica totale negativa, eguale in valore assoluto a quella positiva del nucleo; ossia, uno, due, tre... elettroni, secondo la qualità dell'atomo. Così, ad es., poichè il nucleo dell'atomo di idrogeno ha una carica eguale a quella di un elettrone, tale atomo deve essere costituito da un protone, attorno a cui ruota un elettrone; e questo è l'atomo più semplice che si conosca. Abbiamo visto (§ 223) che il protone è formato di un neutrone e di un positrone; anche il positrone dobbiamo concepirlo come un punto che ruoti attorno al neutrone, vicinissimo ad esso; più lontano ruota l'elettrone. L'atomo di idrogeno cioè, il più semplice di tutti, sarebbe costituito di tre elementi, di cui il primo (neutrone) è *materia*, gli altri due (positrone ed elettrone) sono *energia*.

L'atomo di elio è costituito dal nucleo (formato di 2 protoni e 2 neutroni) e da 2 elettroni periferici, (§ 226); quello del litio dal nucleo e tre elettroni; quello del calcio da 20 elettroni e così via, sino a quello dell'uranio attorno al cui nucleo sono disposti 92 elettroni.

Questo numero di elettroni è quindi fondamentale per la costituzione dell'atomo; esso si chiama il **numero atomico,** e deve essere un numero intero. Quindi possiamo concepire tanti atomi, e perciò tanti elementi diversi, quant'è la serie dei numeri interi; osservando però che la serie oggi conosciuta si arresta all'uranio, il cui numero atomico (il più elevato della serie) è di 92. Con ciò si vede come il numero atomico vada acquistando una grande importanza nella classificazione degli elementi; mentre il vecchio peso atomico la va perdendo.

Confrontando per ciascun elemento il numero atomico col peso atomico, si osserva che (tranne che per l'idrogeno) il primo è sensibilmente la metà del secondo; ma più esattamente il numero atomico corrisponde al numero d'ordine occupato dall'elemento nel sistema di Mendeleieff.

In conclusione, il peso atomico P eguaglia il numero dei protoni contenuti nel nucleo, e quindi esprime anche il numero dei positroni del nucleo; il numero atomico Z invece, rappresenta il numero degli elettroni periferici. Se ne deduce, poichè l'atomo è un sistema elettricamente neutro, che nel nucleo oltre ai positroni vi devono essere tanti elettroni nucleari quanti ne occorrono per neutralizzare l'eccedenza di $P–Z$ di cariche elementari positive. Per es., il potassio ha il peso atomico 39 e il numero atomico 19; quindi il nucleo è formato da 39 protoni, a cui sono attaccati $39 — 19 = 20$ elettroni nucleari; attorno a tale sistema sono disposti 19 elettroni periferici. Come essi sono disposti, vedremo a § 231.

229. **La trasformazione dell'atomo.** — Può darsi che per l'azione di scariche elettriche, o dei raggi X, ecc., un elettrone periferico (cioè tra i più distanti dal nucleo) abbandoni l'atomo; con ciò non viene alterato fondamentalmente l'atomo stesso, e si ottiene solo che per la perdita della carica negativa portata via dall'elettrone, rimanga un atomo carico di elettricità positiva, cioè un ione positivo (§ 224). Questi atomi periferici adunque possono assimilarsi alle comete del mondo solare che sfuggono da un sole all'altro, senza per ciò alterare sostanzialmente ciascun sistema solare.

Ma se l'elettrone è lanciato via tra quelli attaccati al nucleo (*elettroni nucleari*), o se questo si spezza espellendo una particella α (come nei fenomeni radioattivi), allora avviene un cambiamento in tutto l'atomo; il nucleo si riassetta e ne nasce un nuovo elemento. Si tratta pertanto di un fenomeno sostanzialmente diverso da quello precedente.

Con l'atomo nucleare appare perciò possibile la trasformazione degli elementi chimici. Ad es., la preparazione dell'oro da un corpo più comune non è più una cosa impossibile: basterebbe provocare l'espulsione di una particella α e una β da ciascun atomo di mercurio. Solo che ancora non sappiamo come tale espulsione si possa ottenere praticamente.

Ad ogni modo, poichè le proprietà fisiche e chimiche dipendono dalla carica nucleare (perchè questa determina il numero e la disposizione degli elettroni esterni, cioè la specie dell'atomo), *per effettuare una trasformazione dell'elemento è necessario rompere il nucleo medesimo.* Cioè togliendo dal nucleo un'unità nucleare, il nucleo deve subire una modificazione profonda e l'atomo deve trasformarsi.

Questa scissione del nucleo può ottenersi in qualche caso, sottoponendolo al bombardamento delle particelle α, emesse da una sostanza radioattiva. Una di queste particelle, 20000 volte più veloci di un proiettile di fucile, possiede una concentrazione di energia che sorpassa enormemente tutti gli agenti chimici o fisici finora conosciuti. Una particella α pertanto può casualmente (e molto raramente) urtare contro il nucleo e spezzarlo.

Fu appunto sottomettendo la materia ad un bombardamento di particelle α rapidissime, che il Rutherford riuscì per la prima volta ad osservare in modo certo la scomposizione artificiale di un elemento chimico: negli ultimi anni poi, si è ottenuta la disintegrazione di quasi tutti gli elementi. Da questa trasformazione *in ogni caso si è ottenuto l'idrogeno.*

La trasmutazione degli elementi per mezzo dei raggi α, può considerarsi ormai come un fatto certo. Ma l'impiego dei raggi α è tanto oneroso ed il numero degli atomi trasformati è così limitato (in confronto dei miliardi di miliardi di atomi che compongono un piccolissimo peso di sostanza qualsiasi) da rendere vana ed illusoria la speranza che si avveri il sogno della trasmutazione facile del piombo e del mercurio in oro.

230. **I quanti di Planck.** — Con l'atomo di Rutherford è stato compiuto un gran passo nella concezione della struttura dell'atomo; ma nulla si sapeva rispetto alla distribuzione ed alla forma di movimento degli elettroni costituenti l'atomo. Inoltre, se la concezione dell'atomo come un minuscolo sistema solare bastava a spiegare i fenomeni delle scariche nei gas rarefatti, della radioattività, ecc., era però insufficiente a dar ragione della discontinuità dell'energia di cui parleremo fra poco.

È la spettroscopia che ha molto rivelato su questo meccanismo di struttura. Non possiamo entrare in dettagli sul cammino percorso in questo campo; ma le scoperte compiute hanno portato risultati imprevisti, che hanno rivoluzionato la *Fisica* di ieri.

Così Planck (1900) dovette concludere che l'energia emessa nelle radiazioni di un corpo irradiante o assorbita da un corpo opaco in qualsiasi forma di calore, luce, raggi X, ecc., non può variare con continuità; ma a salti, a gradini, secondo multipli di un'energia elementare, costante ed

unitaria, che chiamò **quanto d'azione** o semplicemente **quanto.** Questa, chiamata appunto **la costante di Planck,** è di $6{,}55 \times 10^{-27}$ *erg* per secondo; e domina oramai tutta la *Fisica* d'oggi. L'energia emessa da un corpo irradiante, varia adunque secondo un certo numero di *quanti*, proporzionale alla lunghezza d'onda della radiazione emessa; cioè tale emissione avviene per proiezione di gruppi, tutti eguali di *quanti*; ed Einstein (1905) affermava che queste quantità fisse e finite di energia radiante, mantengono la loro personalità lungo tutto il loro viaggio, dal momento dell'emissione a quello dell'assorbimento. Con ciò abbiamo scoperto in conclusione anche l'**atomo di energia,** e che *la materia irradia solo per quanti, che portano nello spazio una energia finita.*

231. **L'atomo di Bohr.** — Il danese Bohr [1] nel 1913, concepì l'atomo come un meccanismo, nel quale i varî elettroni si muovono senza emettere energia, su una o più orbite, facenti parte di un sistema determinato

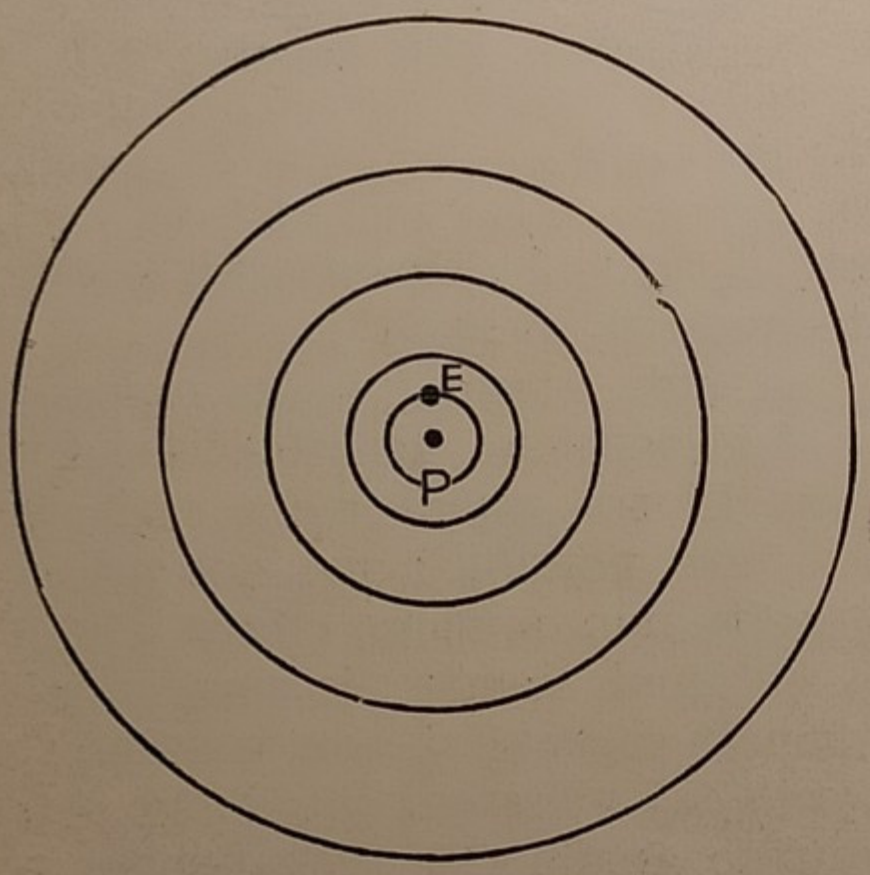


Fig. 347.

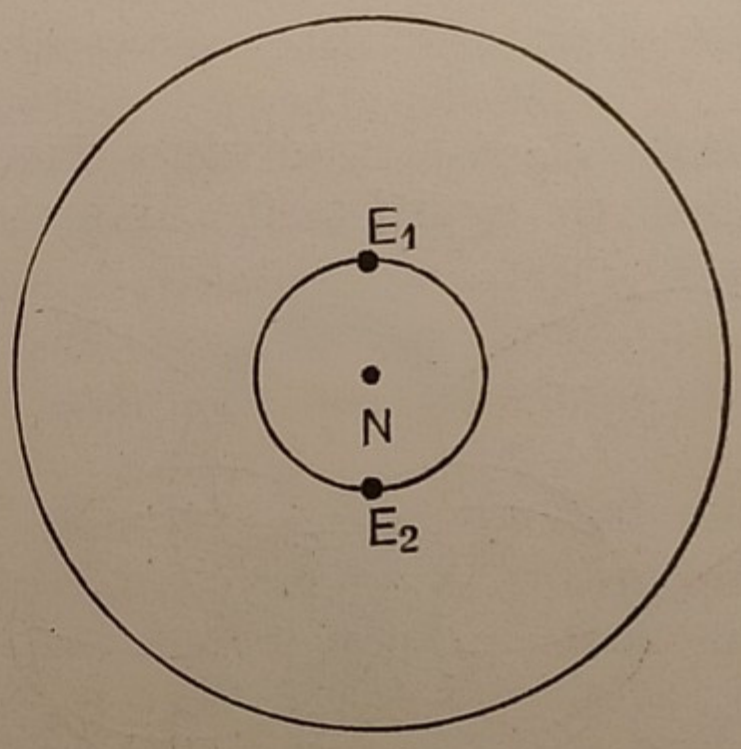


Fig. 348.

di orbite stazionarie, ellittiche, concentriche; ma un elettrone può saltare bruscamente da un'orbita ad un'altra, e con tale passaggio emetterà una data radiazione.

Così, l'atomo di idrogeno, come sappiamo, è costituito da un protone centrale e da un elettrone; esso può essere rappresentato come in Fig. 347, in cui P è il protone nucleare ed E l'elettrone ruotante attorno ad esso; (abbiamo rappresentato le orbite circolari per comodità di disegno, anzichè ellittiche come effettivamente si devono considerare). Il diametro dell'orbita di E (eguale a $1{,}06 \times 10^{-8}$ cm.) e la massa di P, sono rispettivamente il diametro e la massa dell'atomo.

Nelle condizioni normali dell'atomo, l'elettrone si trova sull'orbita più prossima al nucleo; la più piccola cioè e l'atomo non emette energia. Affinchè vi sia emissione di energia (*calore*, *luce*...), bisogna che l'elettrone sia proiettato per una eccitazione esterna (urto, riscaldamento, ecc.) sopra una

---

(1) Bohr Niels, vivente; fisico dell'Università di Copenaghen, n. ivi nel 1885.

delle orbite più esterne; dalla quale ricadrà (*vibrando*) sull'orbita primitiva, emettendo energia radiante. Quest'energia dipende dalla differenza tra i raggi dell'orbita esterna da cui l'elettrone cade e quella interna su cui ricade. Questi raggi non possono essere qualsiasi; essi crescono proporzionalmente ai quadrati della serie dei numeri interi; quindi l'energia emessa può variare solo con discontinuità, secondo multipli determinati di una quantità unitaria, come appunto vuole la *teoria dei quanti* di Planck.

L'atomo di elio nel suo stato normale è formato da un nucleo N di massa 4 volte quella del nucleo d'idrogeno, cioè di 2 protoni e 2 neutroni (§ 228)

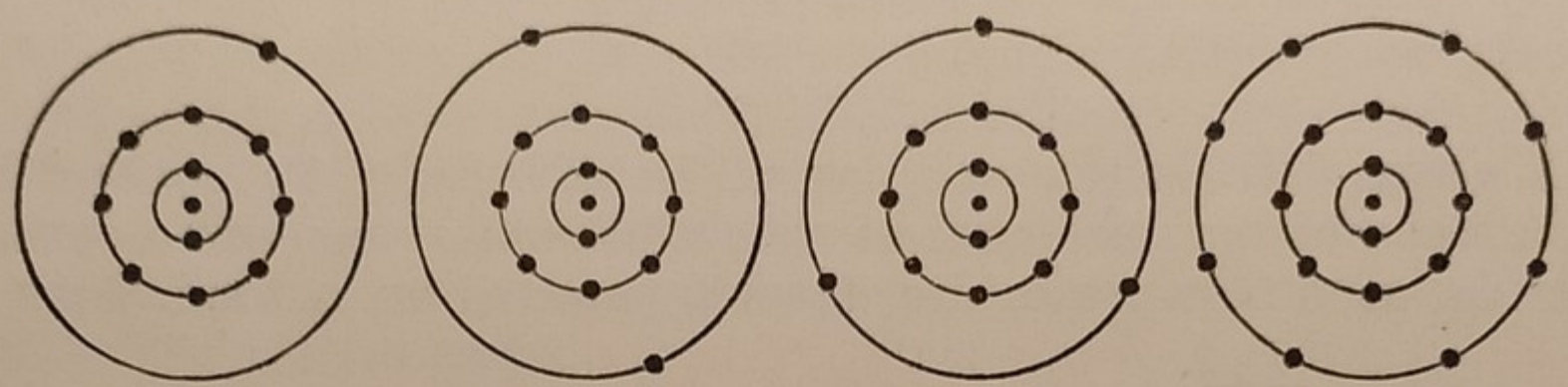


Fig. 349.

attorno a cui si muovono due elettroni $E_1 E_2$ sulla stessa orbita, mantenendosi in ogni istante diametralmente opposti, (Fig. 348).

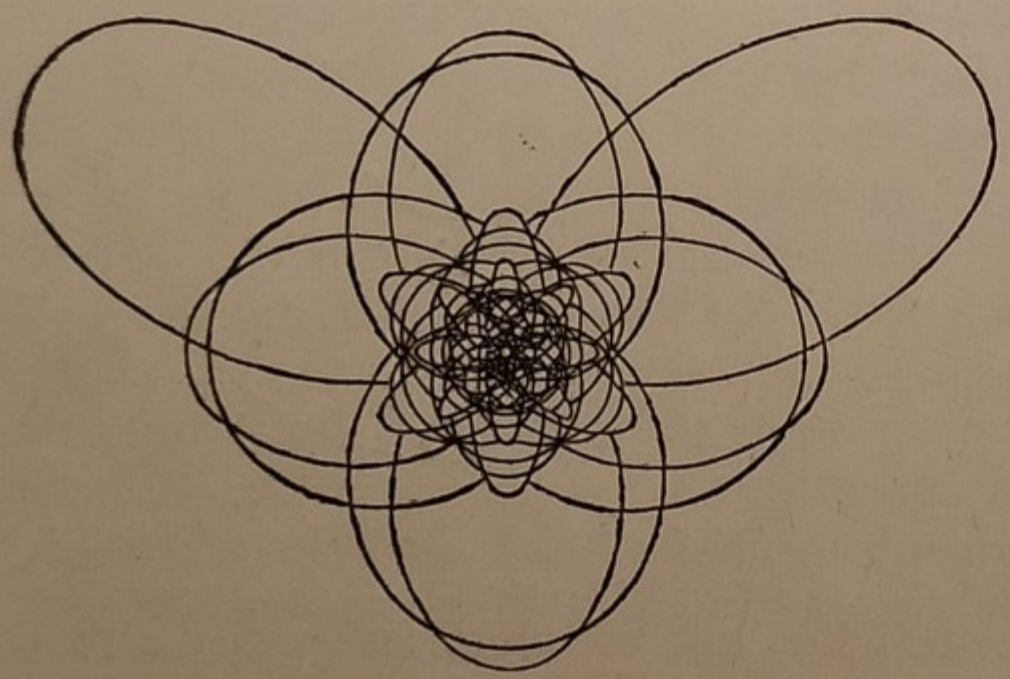


Fig. 350.

Negli atomi più complessi gli elettroni sono distribuiti in diversi anelli tra quelli della serie delle orbite possibili; ma nel primo anello non possono stare che due elettroni, mentre in ciascuno degli anelli successivi non possono stare più di 8 elettroni [1]; mentre nell'ultimo anello esterno possono muoversi da 1 a 8 elettroni; ogni elettrone in più in questo anello esterno, caratterizza l'atomo diverso di ciascuno degli elementi di un gruppo della serie di Mendeleieff. Completato l'anello con 8 elettroni, un nuovo elettrone si dispone nell'anello adiacente, e si passa ad un elemento del gruppo successivo. Nella Fig. 349, è rappresentata la costituzione degli atomi di Sodio, Magnesio, Alluminio, Argon, che fanno parte del 3° gruppo della serie di Mendeleieff.

Concludendo, adunque, dobbiamo concepire *l'atomo costituito da un nucleo estremamente piccolo, nel quale è concentrata tutta la massa dell'atomo, circondato da elettroni in numero eguale al numero atomico, rotanti in anelli o zone distanziate.*

---

(1) Si ricordi che 8 è il numero degli elementi che costituiscono ciascun gruppo, nella classificazione periodica di Mendeleieff; qui non possiamo rilevare le eccezioni che si riscontrano per gli elementi degli ultimi gruppi, risolte con la nuova teoria statistica del Fermi (1928).

Le traiettorie degli elettroni sono ellissi più o meno allungate, aventi il foco sul nucleo, variamente intralciantisi, in piani diversi. La Fig. 350 riproduce un modello schematico dell'atomo di *xeno*, con le orbite dei suoi 54 elettroni.

232. **Le radiazioni ultrapenetranti.** — Fin dal 1903 fu scoperta l'esistenza di altre radiazioni, più penetranti dei raggi X e quindi diverse da queste, capaci di attraversare uno strato d'acqua di 50 m. equivalente ad uno spessore di piombo di circa 5 m.! L'italiano Pacini nel 1908 per il primo proclamava che queste radiazioni ultrapenetranti non avevano origine terrestre. Ma è stato l'americano Millikan [1] (1927) che ha studiato con molta cura, sperimentalmente, queste radiazioni; riscontrandone la presenza sulle alte montagne e perfino nell'alta atmosfera sino all'altezza di 15 km. Ne determinò la lunghezza d'onda, che è di 0,0004 *angström* [2] cioè 2500 volte più piccola di quella dei primi raggi X; il numero delle vibrazioni si aggira perciò attorno ai 10 sestilioni al secondo! Egli trovò che queste radiazioni provengono dagli spazi al di là dell'atmosfera; in parte dal Sole, ma anche da tutte le parti dell'Universo; forse l'origine ne è al di là della via Lattea, quindi fuori del nostro Universo, nelle nebulose o nella materia rarefatta che riempie tali spazi extra-astrali.

Tali radiazioni sono probabilmente generate da fenomeni radioattivi, enormemente più intensi di quelli che osserviamo sulla Terra. Miriadi di radiazioni misteriose adunque scendono a noi continuamente dall'Universo infinito; ci bombardano incessantemente, penetrano da per tutto, nessun ostacolo ordinario le ferma; nè spessore di muraglie, nè fabbricati interi, nè lastre metalliche spesse.

Tali radiazioni di brevissima lunghezza d'onda, che sarebbero certamente nocive allo sviluppo degli esseri organizzati, sono però arrestate quasi totalmente dalla nostra atmosfera. A noi non pervengono che gli ultimi residui di questa enorme energia che solca gli spazi siderali. Che avviene di questa energia viaggiante, e del calore e della luce che porta con sè? Si condensa essa forse qua e là in materia, nocciuoli rudimentali di nuovi mondi? Dobbiamo rintracciare adunque in quella labile materia rarefatta, ancora a noi del tutto ignota, che colma i grandi spazi fra i varî sistemi siderali che popolano l'Universo, il posto dove si formano gli atomi e dove cominciano i primi battiti dei nuovi mondi?

233. **Conclusioni.** — Il cammino percorso non è davvero piccolo; lo sforzo grandissimo ci ha fatto sondare da una parte le profondità dell'Universo, le temperature, la composizione, le trasformazioni, il moto delle stelle e delle nebulose; dall'altra ci ha rivelato la struttura degli atomi. Siamo riusciti a misurare, a contare, a pesare, gli atomi e le molecole; abbiamo messo in evidenza la struttura intima dei cristalli; si è scoperto il fatto fondamentale della discontinuità, rivelantesi in ogni branca della *Fisica atomica*; e cioè che la Natura nei fenomeni elementari procede a

---

(1) Millikan Robert, vivente; fisico dell'Istit. Tecnologico di Pasadena (California).

(2) L'*angström* (A), la più piccola unità di lunghezza, equivale a *un decimilionesimo di millimetro*: $1\ A = 10^{-8}$ cm.

scatti, a gradini; in quelli macroscopici tale discontinuità è naturalmente mascherata e gli scienziati per molti secoli neanche se ne accorsero.

Ma ora fermiamoci in questo rapido, rudimentale cenno sulle recenti scoperte. Non ingolfiamoci nelle nuovissime teorie, ancora in gestazione, che affacciando dei dubbi sulla ipotesi di Bohr per la costituzione dell'atomo, negherebbero la teoria ondulatoria delle radiazioni, per rimettere in onore quella dell'emissione e apporterebbero nuovi lumi nella concezione del mondo ultrapiccolo. Questa è la *Fisica* di domani; un'altra *Fisica* imprevista, meravigliosa, regnante nel campo dell'atomo. Non insistiamo perciò sulle nuove affermazioni che *la massa di un corpo non è costante*, perchè essa varia con la velocità di cui il corpo è animato; e che la materia dotata di radiazione diminuisce di massa,[1] poichè l'energia di radiazione possiede anch'essa una massa! Tutte teorie seducenti, ma che hanno per il fisico il grave inconveniente di essere fondate principalmente sull'astrazione pura delle formule matematiche. Ma il puro sistema delle formule lascia lo studioso insoddisfatto; niente può essere più fatale al progresso della *Fisica*, che una troppa confidenza coi simboli matematici: perchè si è condotti così ad assumere la formula e non il fatto come la realtà fisica.

Le nuove concezioni sull'atomo, ci conducono ad ammettere *l'unità della materia*; gli atomi si scindono, si trasformano, si riassettano; ma in ogni caso ne nasce sempre l'idrogeno. E la base di questo non è che il protone e l'elettrone; tutta la materia dell'Universo, non è che un insieme di protoni e di elettroni. Questo è il mondo nuovo rivelato da Curie, da Rutherford, da Soddy e dagli altri colossi della scienza.

Coi nuovi fenomeni pertanto abbiamo portato il nostro spirito in più intimo contatto con l'essenza della Natura. Ma nulla ancora possiamo dir sull'essenza del positrone e dell'elettrone; così piccoli da non potersi più considerare come materia. Si pensa che essi possano essere un moto vorticoso di un punto dell'etere; la differenza tra il positrone e l'elettrone potrebbe essere unicamente il senso in cui avviene la rotazione del punto. Questo minuscolo vortice, col suo immensamente rapido moto rotatorio, assumerebbe quella compattezza e quella rigidezza che ai nostri sensi presenta la materia. Con ciò arriveremmo ad immaginare che *la materia non sia che un aggregato di punti dell'etere in rapido movimento*. Questa concezione puramente cinetica della costituzione dei corpi, ci condurrebbe a pensare che la materia in fondo non esista, e che tutte le proprietà di essa non siano che conseguenza del movimento. Concezione audace ed azzardata, che siamo ancora ben lontani da ammettere come possibile.

Pure ammessa tale ipotesi, ci sarebbe ancora da dire: e che sono i punti dell'etere? e da dove è scaturita quell'energia che mettendoli in movimento dà origine all'elettrone, all'atomo, all'Universo? Ecco una domanda a cui la nostra mente non può ancora rispondere; ma riconosciamo che sia già molto che la scienza sia pervenuta alla *concezione di un'energia illimitata, universale, come origine della creazione dei mondi*.

---

(1) È ormai accertato che, almeno in speciali condizioni, la materia stessa in piccolissima quantità si può trasformare in energia; e viceversa particolari energie in determinate condizioni possono trasformarsi in materia. Questa scoperta è davvero la più grandiosa e la più sensazionale che potevamo attenderci, e ci fa intravedere un mondo di concezioni nuove sull'essenza della materia e sulla genesi di essa.

ELETTRODINAMICA

Elettricità di contatto.

234. **Esperienza di Galvani.** — Dovremo ora studiare un altro modo di generare elettricità, in misura assai più abbondante di quello che si è visto in precedenza. La nuova scoperta è stata fatta al principio del secolo passato; ed è della massima importanza, perchè è l'origine della produzione odierna dell'elettricità in abbondanza e con poco costo; rendendone possibili le numerose applicazioni di oggi, e fornendo al mondo il principale fattore dell'odierna civiltà.

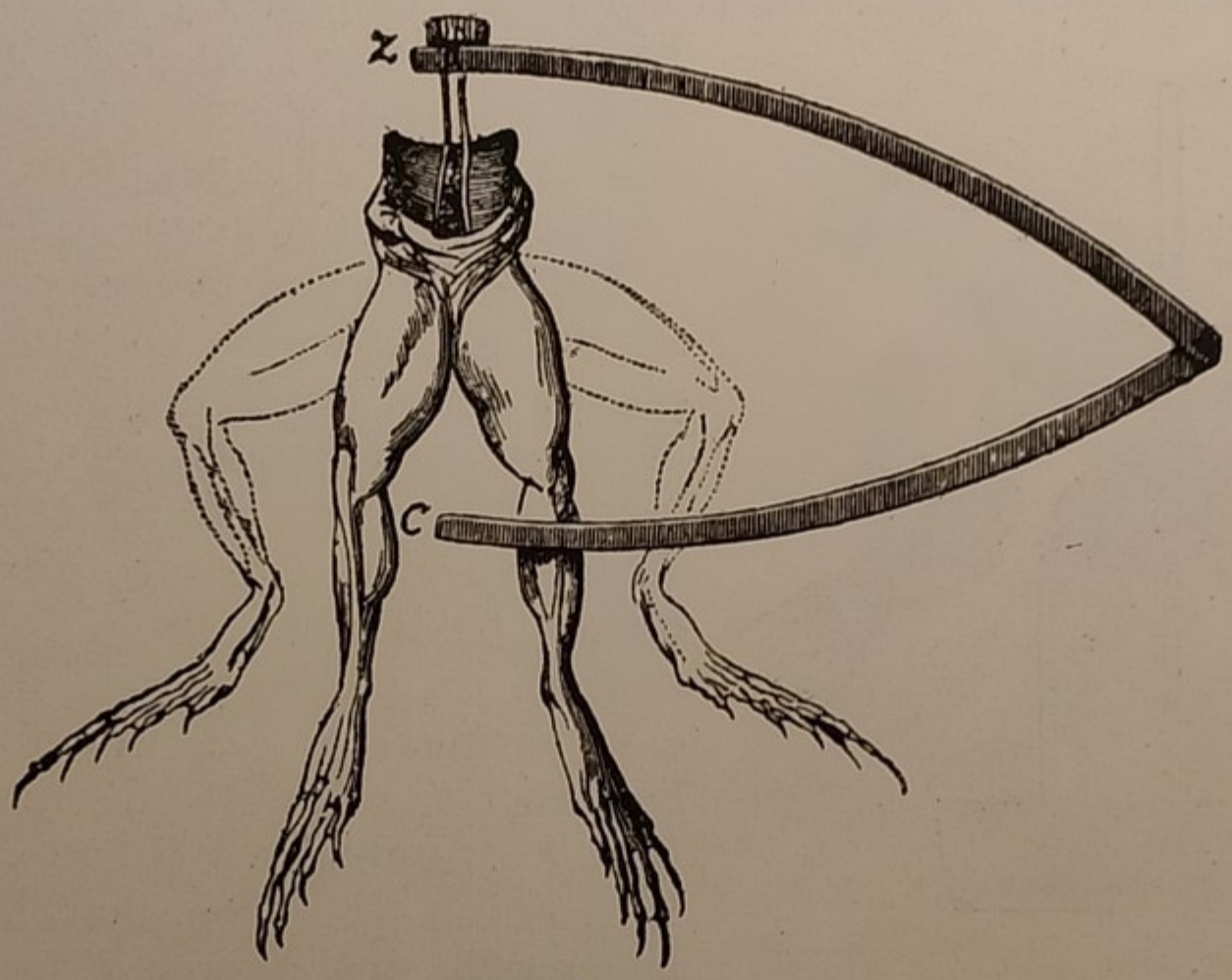


Fig. 351.

La scoperta è derivata da un'esperienza eseguita nel 1786 da Galvani, [1] fisiologo bolognese. Egli osservò che ogni volta si toccavano con un archetto di metallo da una parte i nervi lombari e dall'altra i muscoli della coscia, di una rana scorticata, questa aveva una contrazione delle gambe, (Fig. 351).

Il Galvani suppose che la rana agisse come un condensatore, di cui i nervi costituivano un'armatura e i muscoli l'altra; tale condensatore si caricava per elettricità generata dalle funzioni vitali, e si scaricava al momento del contatto con l'archetto, provocando la scossa sulla rana.

Ma Alessandro Volta [2], fisico dell'Università di Pavia, osservò che l'esperienza riusciva bene solo se l'archetto era formato di due metalli diversi; ad es., rame e zinco, (1792). Egli allora pensò che l'origine dell'elettricità che interveniva in questa esperienza, fosse nei metalli dell'archetto, e che la rana agisse semplicemente come un elettroscopio.

---

(1) Galvani Luigi; n. a Bologna nel 1737, m. ivi nel 1798.

(2) Volta Alessandro, sommo fisico italiano; n. a Como nel 1745, m. ivi nel 1827.

Nacque tra il Galvani ed il Volta una celebre polemica, che finì con la vittoria del Volta; il quale riuscì a dimostrare che col contatto di due metalli diversi si stabilisce fra questi una differenza di potenziale; servendosi anzichè delle rane di un elettroscopio speciale, che chiamò **elettroscopio condensatore.**

I successivi studî hanno dato ragione ad entrambi gli scienziati; poichè oggi è innegabilmente dimostrato che gli organi degli animali sono origine di fenomeni elettrici; e non v'è più alcuno che contesti l'esistenza di un'*elettricità animale*. Una parte almeno delle esperienze di Galvani deve trovare spiegazione nell'elettricità propria della rana, come del resto riconobbe più tardi il Volta medesimo.

235. **Elettroscopio condensatore.** — Esso serve per corpi elettrizzati anche a basso potenziale (una frazione di volt), com'è nel caso che ora dobbiamo studiare; mentre un elettroscopio ordinario richiede un potenziale di qualche centinaio di volt, per dare una deviazione visibile delle foglioline (§ 182).

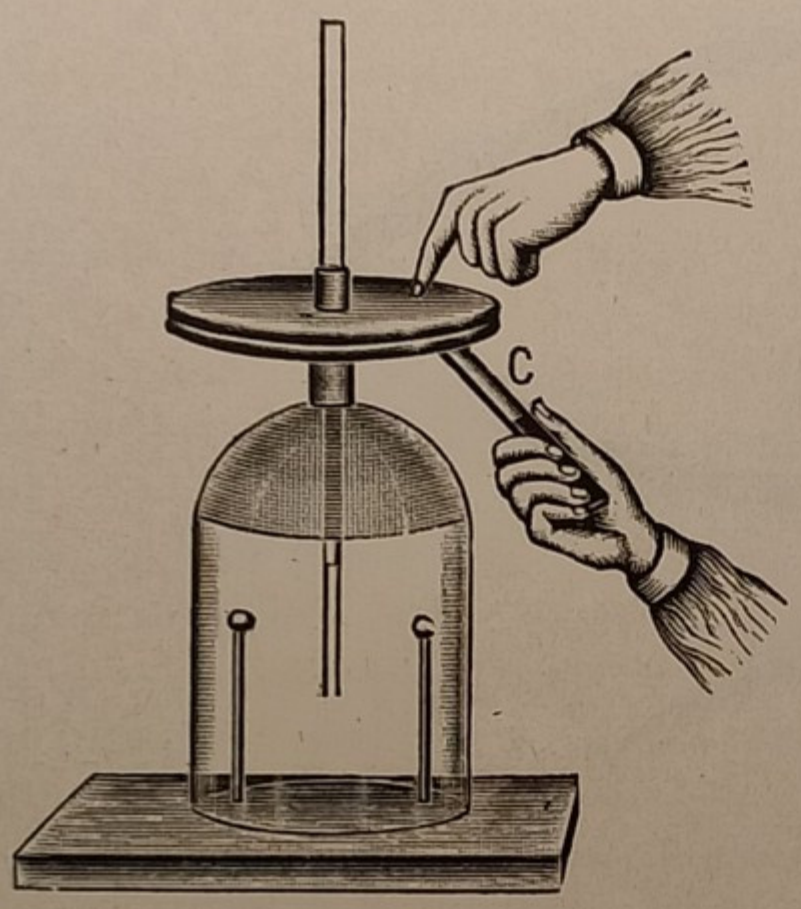


Fig. 352.

L'**elettroscopio condensatore** è formato da un elettroscopio comune a foglie d'oro, che al posto del bottone porta due dischi di rame sovrapposti, verniciati con gomma lacca sulle facce in contatto (Fig. 352). Il disco superiore è tenuto da un manico isolante. Questi due dischi formano le armature di un condensatore, di cui il coibente è la vernice; ed essendo il coibente sottilissimo, la capacità di questo condensatore è grandissima (§ 189 - 2).

Si abbia un corpo elettrizzato C a basso potenziale, ma *capace di fornire una grande quantità di elettricità*; si tocca con esso il disco inferiore ed il superiore col dito. Così facendo si carica il condensatore; ma le foglie non divergono, perchè il potenziale delle armature, eguale a quello della sorgente C, è ancora piccolo; sebbene su di esse si accumuli una forte quantità di elettricità.

Allontaniamo ora il corpo C e togliamo il dito; indi solleviamo il disco superiore: con ciò non si ha più condensatore, e la capacità del disco inferiore diminuisce grandemente. E allora, per la grande quantità di elettricità accumulatavi e tuttora rimastavi, essendo piccola la capacità deve aumentare fortemente il potenziale; tanto da far divergere le foglioline.

236. **Esperienze di Volta.** — Con l'elettroscopio precedente il Volta eseguì tre classiche esperienze, che riportiamo; esse si spiegano appunto con l'ipotesi che due metalli eterogenei, solo *perchè si toccano* si elettrizzano a diverso potenziale. Nel caso in cui i due metalli siano lo zinco ed il rame, è lo zinco che si dispone a potenziale più alto.

1ª Esperienza. Si prende un archetto metà di rame e metà di zinco; si tiene lo zinco in mano, e si tocca l'elettroscopio col rame; *le foglie divergono con elettricità negativa*, (Fig. 353). Infatti lo zinco (*Zn*) tenuto in mano cioè in comunicazione con la terra, è a potenziale *zero*; il rame (*Cu*) per il contatto con lo zinco si dispone a potenziale inferiore a questo, cioè a potenziale negativo, ossia è *elettrizzato negativamente*. Non essendovi altri contatti eterogenei, (l'oro delle foglioline equivale elettricamente al rame), tale elettricità negativa si trasmette alle foglioline, che divergono.

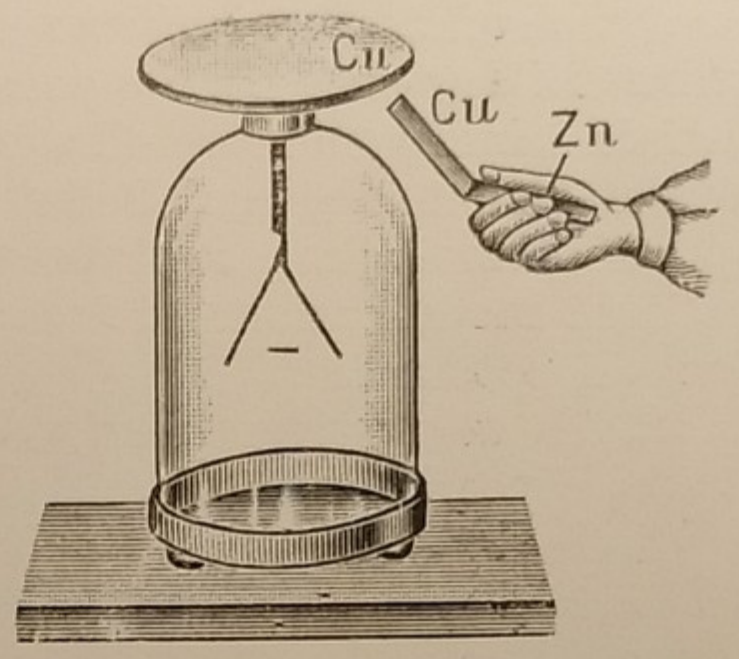


Fig. 353.

2ª Esperienza. Si tiene l'archetto dalla parte del rame, e si tocca l'elettroscopio con lo zinco: *le foglie non divergono*, (Fig. 354). Infatti è ora il rame a potenziale zero, perchè in comunicazione con la terra; lo zinco è a potenziale maggiore del rame, cioè positivo; ma ora vi è un altro contatto eterogeneo fra lo zinco ed il disco di rame dell'elettroscopio; questo disco di rame deve essere ad un potenziale inferiore allo zinco di tanto quanto è la bacchetta di rame tenuta in mano; cioè il disco sarà anch'esso a potenziale zero, ossia *senza elettricità*; le foglioline quindi sono anch'esse diselettrizzate.

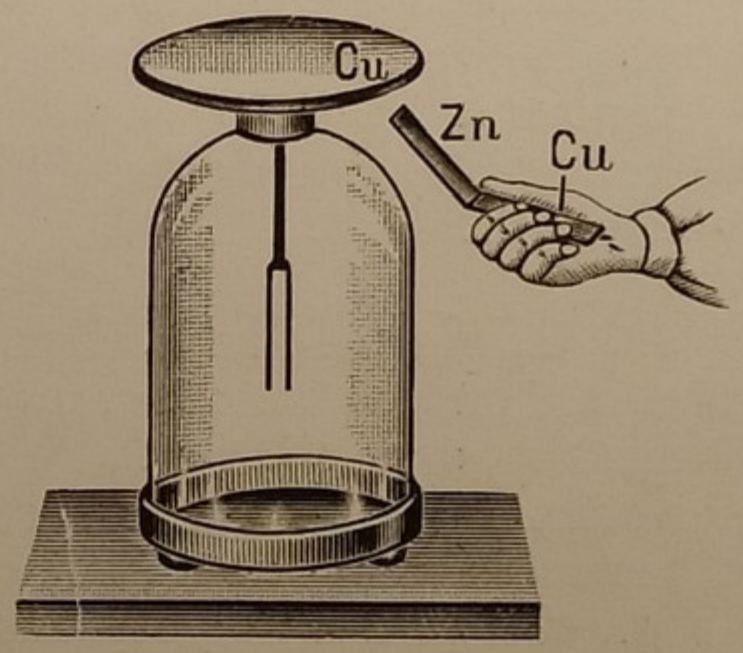


Fig. 354.

3ª Esperienza. Si tiene ancora l'archetto dalla parte del rame; ma fra lo zinco ed il disco dell'elettroscopio si interpone un pannolino bagnato di acqua acidulata con acido solforico: *le foglioline divergono con elettricità positiva*, (Fig. 355). Ciò vuol dire che l'elettricità positiva dello zinco ha potuto arrivare sino alle foglioline, senza che i contatti *zinco - acido - rame* l'abbiano annullata; quindi l'acido, pur conducendo l'elettricità, non stabilisce col suo contatto differenza di potenziale.

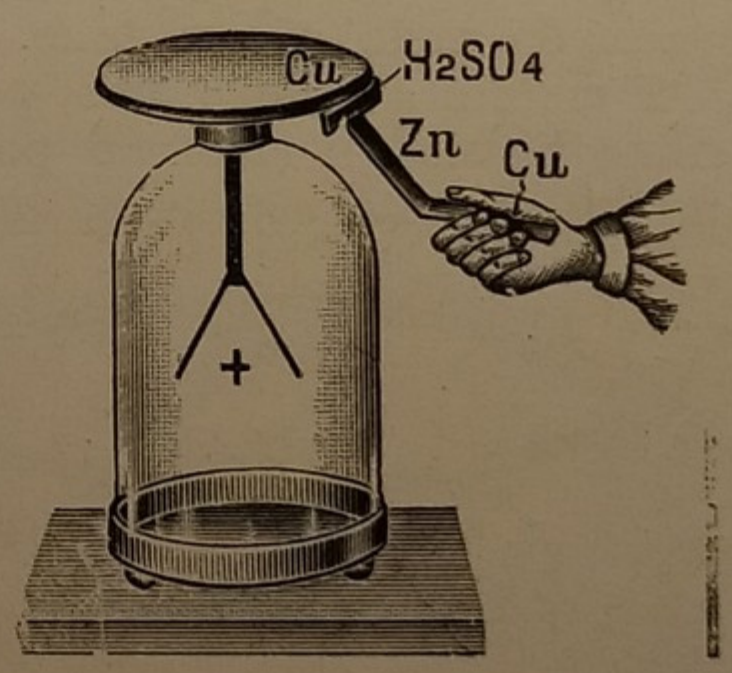


Fig. 355.

Perciò Volta distinse i conduttori in due categorie:

Conduttori di prima classe o perfetti elettromotori, (i *metalli*, il *mercurio*, il *carbone*, ecc.), che col loro contatto eterogeneo formano differenza di potenziale.

Conduttori di seconda classe, o imperfetti elettromotori, (le *soluzioni acquose di sali e di acidi*, ecc.), che conducono l'elettricità, ma non formano differenza di potenziale.

237. **Leggi di Volta sulle tensioni.** — Dalle precedenti e da numerose altre esperienze, il Volta trasse le seguenti leggi:

1. **Principio del contatto.** *Nel contatto di due conduttori eterogenei qualsiasi, si stabilisce fra essi una differenza di potenziale che dipende solo dalla natura dei due conduttori e dalla loro temperatura.* Cioè la differenza di potenziale è indipendente dalla forma e grandezza dei conduttori, dall'estensione del contatto, ecc. Pellat dimostrò che tale differenza di potenziale dipende principalmente dallo stato della superficie dei due conduttori; e che ogni modificazione di essa, anche minima, altera il valore della differenza di potenziale.

2. In una catena aperta di conduttori, la differenza di potenziale agli estremi dipende unicamente dalla natura di essi e dalla loro temperatura.

3. In una catena aperta di soli conduttori di prima classe (soli metalli), *la differenza di potenziale fra i metalli estremi è quella che si avrebbe se questi fossero in contatto immediato.* Questa legge, detta dei metalli intermedi, autorizza a saldare due conduttori nel punto di contatto; la saldatura non produce variazione di potenziale, come se non vi fosse.

4. In una catena chiusa, formata di soli metalli, tutti alla stessa temperatura, la forza elettromotrice (§ 184) *risultante è nulla.*

5. La forza elettromotrice risultante è pure nulla, se la catena è aperta, ma con gli estremi del medesimo metallo. Questa legge si può riguardare come un corollario della *3.*

238. **Origine della f. e. m. di contatto.** — Si spiega nella seguente maniera l'origine della f. e. m. di contatto, con l'ipotesi degli elettroni. Abbiamo supposto nel § 162, che nei conduttori solidi, e quindi nei metalli, gli elettroni possano spandersi e circolare liberamente da un atomo all'altro, in tutta la massa del metallo; mentre i nuclei degli atomi sono immobili. Ma gli elettroni non potranno abbandonare il metallo (a meno che non vengano scacciati da qualche energia: elettrica, luminosa, calorifica, come abbiamo già studiato in precedenza). Cioè il metallo esercita una certa attrazione sugli elettroni; diremo meglio una certa **affinità elettronica,** che varia da metallo a metallo.

I metalli alcalini (*sodio*, *potassio*, ecc.) hanno la minore affinità elettronica; perciò gli elettroni possono abbandonarli facilmente per azione di un'energia anche piccola, quale quella della luce, (§ 213).

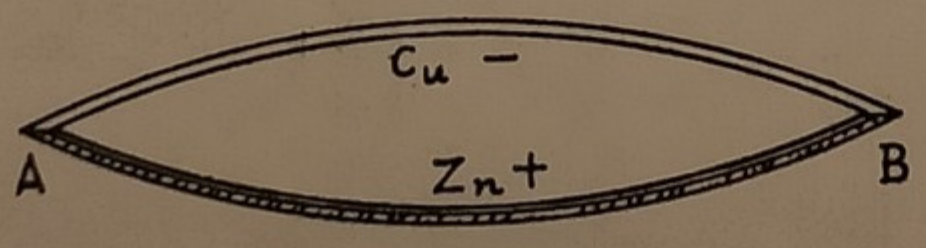


Fig. 356.

Lo zinco ha affinità elettronica minore del rame; quindi ponendo in contatto zinco e rame, questo attirerà a sè elettroni dallo zinco e si elettrizzerà negativamente; mentre lo zinco, per deficienza di elettroni, si elettrizzerà positivamente. Il passaggio di elettroni dallo zinco al rame si arresterà allorchè la repulsione esercitata dagli elettroni accumulatisi sul rame verso quelli rimasti sullo zinco, eguaglia l'attrazione esplicata dal rame per la sua maggiore affinità elettronica. *La diversa concentrazione degli elettroni sui due metalli, costituisce perciò la differenza di potenziale di contatto*; e poichè l'affinità elettronica dipende anche dalla

temperatura dei metalli, si spiega anche la variazione della differenza di potenziale con la temperatura. Si spiegano parimenti le altre leggi del Volta (§ 237). Così, ad es., la 4ª legge scaturisce dal fatto che una volta accumulatisi elettroni su *Cu* (Fig. 356) e diradatisi su *Zn*, si è raggiunto un equilibrio statico; per il quale non vi sarà più movimento di elettroni da un metallo all'altro, nè attraverso *A*, nè attraverso *B*. Quindi, pur essendovi tra i due metalli differenza di potenziale, non vi è passaggio di elettricità dall'uno all'altro; cioè la f.e.m. è nulla.

Fig. 357.

239. **Pila di Volta.** — Applicando le leggi scoperte, il Volta costruì nel 1800 il primo generatore di elettricità dinamica, che egli chiamò **la pila** per la sua forma di colonna, e che Arago definì come *il più meraviglioso strumento che mai fosse dagli uomini inventato* (1).

Noi la chiamiamo oggi **pila a colonna,** per distinguerla dalle altre; essa è formata da più *coppie* o dischi, da una faccia di rame e dall'altra di zinco, sovrapposti nello stesso ordine, e separati uno dall'altro da un disco di panno inzuppato con acqua acidulata di acido solforico, (Fig. 358). Fra il rame del primo disco e lo zinco dell'ultimo si stabilisce una differenza di potenziale, *n* volte quella che è tra rame e zinco di un disco, se *n* è il numero dei dischi impiegati.

Ma questa pila aveva parecchi inconvenienti; il Volta l'abbandonò presto, e la sostituì con l'altra **a corona di tazze,** (Fig. 359). È formata con molti

(1) La Fig. 357 riproduce un quadro di G. Bertini, raffigurante il Volta che presenta la pila a Napoleone Bonaparte.

bicchieri (*tazze*) disposti in circolo, contenenti ciascuno una lastra di rame e una di zinco, immerse in acqua acidulata con acido solforico, e congiungendo il rame di un bicchiere (*elemento* o *coppia*) con lo zinco del successivo. Il primo rame e l'ultimo zinco rimangono liberi, e formano i due **poli** della pila; tra di essi si stabilisce una differenza di potenziale che è ancora $n\varepsilon$, se n è il numero degli elementi ed ε la differenza di potenziale che si forma al contatto rame-zinco.

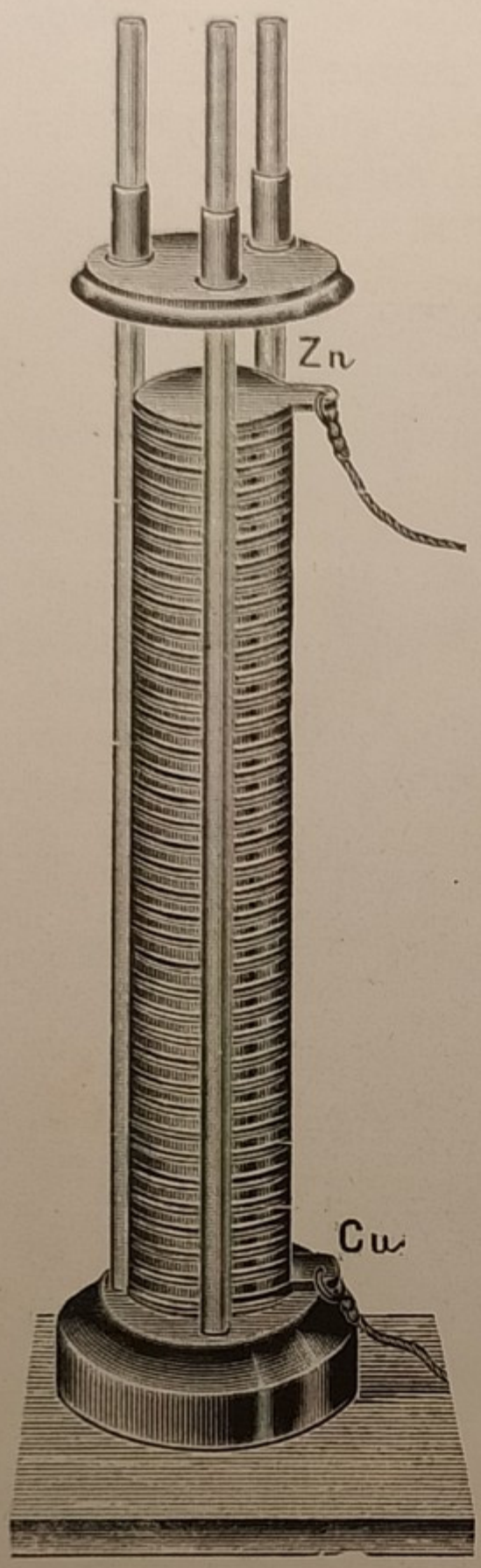


Fig. 358.

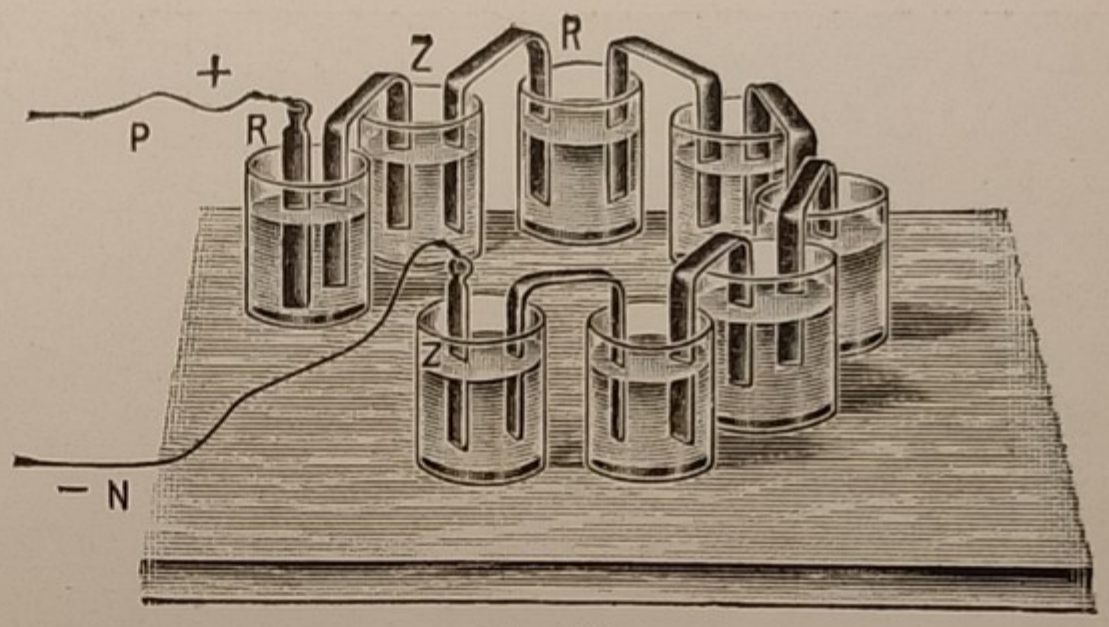


Fig. 359.

Infatti, per il principio del contatto: sia V il potenziale dello zinco del 1° elemento; per l'ufficio dell'acido (§ 236) sarà pure V il potenziale del rame del 1° elemento. Ma nel contatto di questo rame con lo zinco del 2° elemento, si deve stabilire per la 1ª legge di Volta (§ 237) una differenza di potenziale ε; onde il potenziale del 2° zinco sarà $V + \varepsilon$. Pari potenziale avrà il rame del 2° elemento, mentre lo zinco del 3° elemento per il nuovo contatto rame-zinco, sarà a un potenziale più alto, cioè $V + 2\varepsilon$. E così via; l'ultimo rame sarà al potenziale $V + n\varepsilon$. Quindi la differenza di potenziale tra questo ed il primo zinco sarà $n\varepsilon$, come s'era detto.

240. **La corrente elettrica.** — Poichè fra i due poli della pila vi è differenza di potenziale, congiungendoli con un filo conduttore avverrà un passaggio di elettricità. A differenza del condensatore dove tale passaggio avveniva in un attimo, perchè le due armature si disponevano subito allo stesso potenziale, qui la differenza di potenziale fra i poli della pila si mantiene perennemente; quindi il passaggio dell'elettricità è perenne e forma la cosidetta **corrente elettrica.** L'elettricità, passa dallo zinco, ch'è a potenziale più alto, al rame, *attraverso la pila*; quindi nel conduttore esterno che congiunge i due poli, proseguendo senza ritornare indietro, va dal rame verso lo zinco. Interessando a noi il formarsi della corrente nel conduttore esterno, assumeremo perciò come polo positivo (+) il rame da cui parte la corrente, e come polo negativo (—) lo zinco a cui essa viene. Si noti che *questa corrente è puramente una nostra convenzione*, poichè l'elettricità non è materia che si muova nei conduttori.

Il conduttore esterno interposto tra i poli forma il **circuito esterno**; la pila **il circuito interno**, tutti insieme **il circuito della corrente**. I fili conduttori che si attaccano ai poli per portare la corrente nel circuito esterno, si dicono i **reofori**. **Chiudere il circuito** vuol dire far passare la corrente; **aprire il circuito** vuol dire interrompere la corrente. La pila produce **corrente continua**, cioè che circola sempre nel medesimo senso.

Possiamo renderci conto della costituzione della corrente elettrica nell'ipotesi elettronica. Siano A e B due poli a diverso potenziale; A, ad es., quello positivo; congiungiamoli con un conduttore metallico. Gli elettroni di questo, liberi di muoversi, sono attratti da A perchè carichi di elettricità negativa; mentre altri elettroni, richiamati da B, lo invadono. Si ha così un flusso continuo di elettroni da B verso A, che forma *la corrente elettrica*. Questa corrente di elettroni, perciò, va dal polo negativo a quello positivo; cioè dal potenziale più basso al più alto. Essendo ciò in contradizione con le analogie idrauliche richiamate in varie occasioni, noi penseremo invece a quel che avverrebbe se nel conduttore vi fossero cariche positive mobili; esse andrebbero dal polo positivo a quello negativo, e questo assumiamo come *senso della corrente elettrica*.

Concludendo, in un circuito elettrico il flusso degli elettroni avviene in senso contrario a quello della corrente elettrica.

Effetti chimici della corrente.

241. **Elettrolisi.** — Prendiamo un bicchiere di vetro V, per il cui fondo passano due fili o laminette di platino f_1 e f_2; mettiamo queste in comunicazione l'una col polo + e l'altra col polo — di una conveniente pila P (Fig. 360). Se nel bicchiere si mette acqua distillata, cioè pura, non vi passa corrente; perchè l'acqua pura è un isolante. Ma se aggiungiamo qualche goccia di acido solforico, la corrente passa, e si vedono svolgere dalle laminette di platino numerose bollicine gassose, che rendono il liquido effervescente.

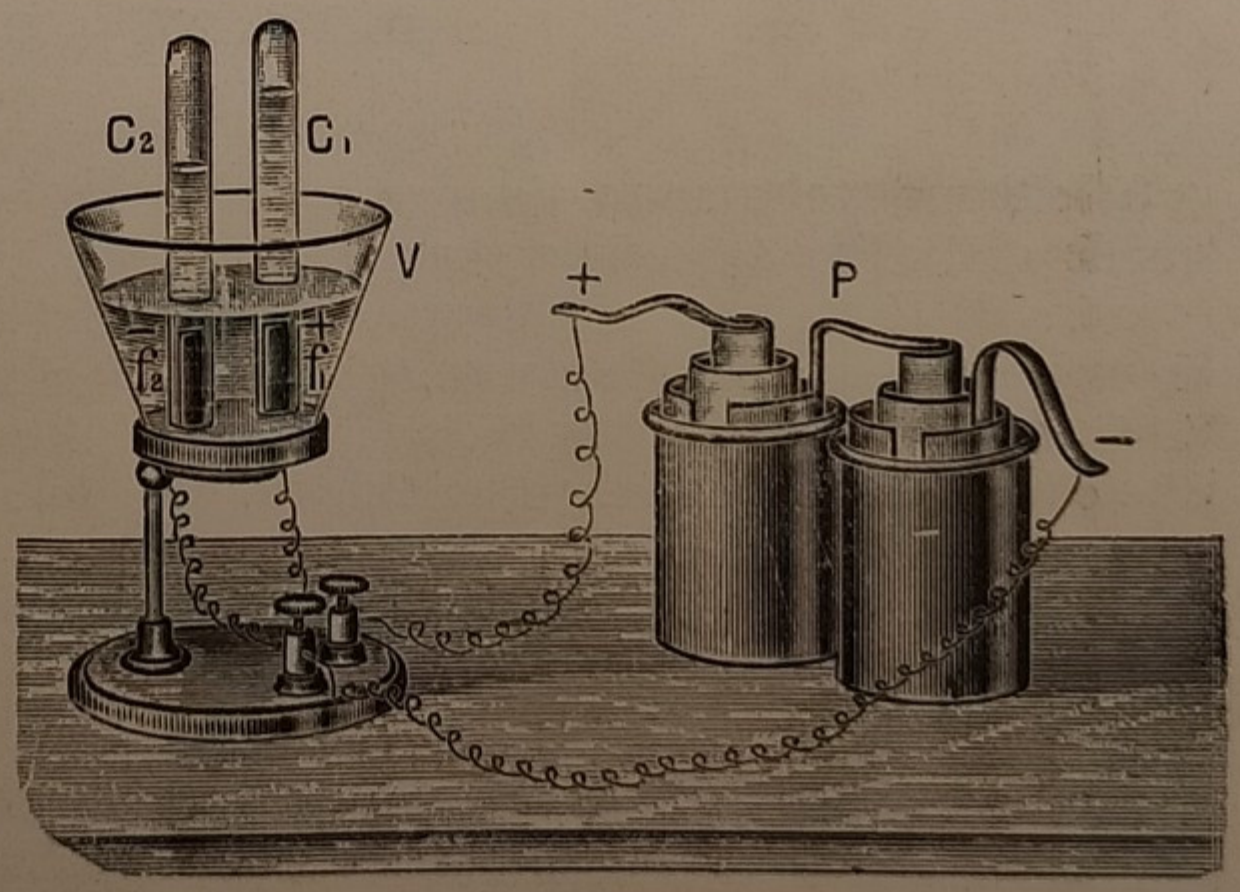


Fig. 360.

Si possono raccogliere questi gas ricoprendo ciascuna laminetta con una campanella di vetro graduato C_1 e C_2, a principio piene della stessa acqua acidulata che è nel bicchiere. Si vedranno le bollicine staccarsi dalle laminette, risalire nel liquido e raccogliersi via via

sempre in maggiore quantità in cima alle campanelle; ma si vedrà che *il gas che si raccoglie al polo + si mantiene costantemente in volume metà che al polo —*.

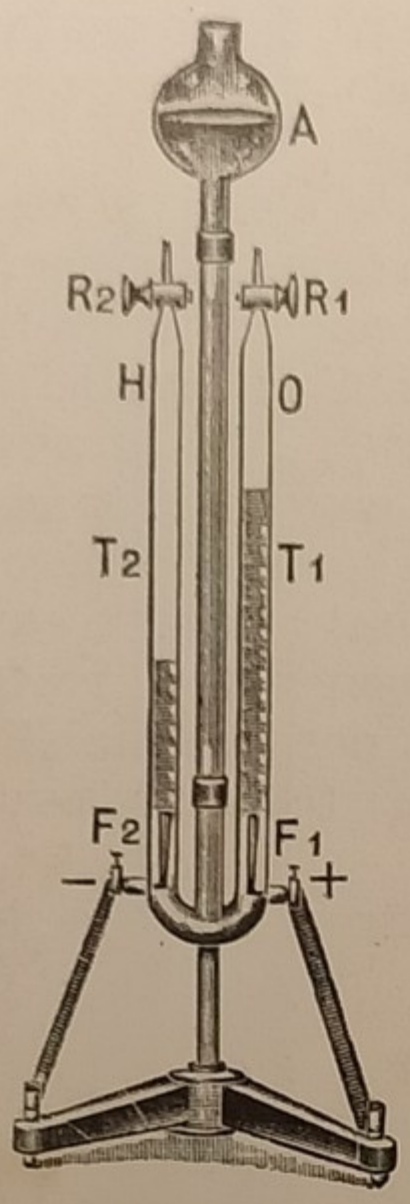


Fig. 361.

Per fare uscire i gas dalle campanelle, allo scopo di riconoscerne la natura, è preferibile fare l'esperienza con un apparecchio della forma della Fig. 361. Il bicchiere è sostituito da un'ampolla A contenente l'acqua acidulata; le laminette di platino sono F_1 e F_2; le campanelle sono i tubi T_1 e T_2 che in alto portano ciascuno un rubinetto R. Anche ora, passando la corrente, si svolgono da F_1 e F_2 bollicine gassose che si raccolgono in alto; quando ve n'è una sufficiente quantità, si apra R_2 e si accosti un fiammifero acceso; il gas che vi si trova, spinto dalla pressione del liquido di A, esce da R_2 e si accende con una fiammella senza luce; sappiamo che tale modo di bruciare è caratteristico dell'**idrogeno**; concludiamo che dalla laminetta — si svolge idrogeno. Facendo la stessa esperienza in R_1, il gas che ne esce non s'accende, ma fa bruciare più vivamente il fiammifero che vi si avvicina, cioè alimenta la combustione; sappiamo che questa è la proprietà caratteristica dell'**ossigeno.** Adunque in questa esperienza si producono *al polo + ossigeno*, ed *al polo — idrogeno*, il secondo in volume doppio del primo.

Ricordando dalla chimica, che tali elementi in tale proporzione compongono l'acqua (H_2O), concludiamo che la corrente elettrica ha scomposto l'acqua nei suoi elementi, (i segni — e + posti inferiormente, indicano su quale polo si svolgono le sostanze):

1)
$$\underset{}{H_2O} \leftrightarrows \underset{-}{2\,H} + \underset{+}{O}$$

Si chiama **voltametro** l'apparecchio in cui si compie la scomposizione: quello della Fig. 360 è il *voltametro di Volta*, l'altro della Fig. 361 è il *voltametro di Hoffmann*; si chiama **elettrolisi** il fenomeno della scomposizione di una sostanza con la corrente elettrica; **elettrolito** è la sostanza che si decompone; **elettrodi** sono le due laminette (di platino o di altro conduttore) che conducono la corrente nell'elettrolito; **anodo** quella che comunica col polo +, **catodo** quella che comunica col polo —; **ioni** si chiamano i prodotti della scomposizione; **anione** quello che si svolge nell'anodo, **catione** quello che si svolge al catodo.

242. **Altri esempi di scomposizione.** — Non è solo l'acqua che si scompone con la corrente elettrica; ma qualunque sostanza che si sciolga nell'acqua (o in altri liquidi detti *attivi*). Così ad esempio:

L'*acido cloridrico* HCl si scompone in idrogeno e cloro, in volumi eguali:

2)
$$\underset{}{HCl} \leftrightarrows \underset{-}{H} + \underset{+}{Cl}$$

L'*ammoniaca* H_3N (1) si scompone in idrogeno e azoto, il primo in volume triplo del secondo:

$$\underset{}{H_3N} \rightarrow \underset{-}{3\,H} + \underset{+}{N} \qquad \text{ecc.}$$

I prodotti della scomposizione elettrolitica si formano solo sulla superficie di separazione degli elettrodi col liquido, e mai dentro gli elettrodi o in mezzo al liquido.

243. **Reazioni secondarie.** — Ma raramente gli ioni ottenuti si raccolgono liberi; perchè essi reagiscono con l'elettrodo su cui si svolgono o (se questo è inattaccabile) con l'elettrolito.

Così, ad es., il *solfato di rame* ($CuSO_4$) sciolto nell'acqua, si scompone in Cu ed SO_4:

3) $$CuSO_4 \leftrightarrows \underset{-}{Cu} + \underset{+}{SO_4}$$

Il rame si svolge al catodo e si deposita sull'elettrodo, senza attaccarlo; il residuo SO_4 si svolge all'anodo. Ora tale residuo non esiste come sostanza chimica, quindi non può raccogliersi. Vi sono due casi:

1. *Se l'anodo è di sostanza inattaccabile*, p. es. di platino, l'SO_4 reagisce con l'acqua della soluzione che circonda l'elettrodo, e forma acido solforico ed ossigeno:

4) $$SO_4 + H_2O \rightarrow H_2SO_4 + O\,.$$

L'effetto finale è un deposito di rame al catodo, e sviluppo di ossigeno all'anodo; mentre la soluzione attorno a questo si rende acida.

2. *Se invece l'anodo è attaccabile*, p. es. è di rame, l'SO_4 l'attacca e si forma il solfato di rame:

5) $$SO_4 + Cu \rightarrow CuSO_4\,.$$

Cioè sul catodo si deposita rame ed altrettanto se ne sottrae dall'anodo; mentre per una molecola di solfato di rame scomposta un'altra se n'è ricomposta. *L'effetto finale è pertanto un passaggio di rame dall'anodo al catodo*, mentre l'elettrolito rimane invariato.

Come esempio di reazione del catione, citiamo la scomposizione del nitrato di potassio KNO_3, sempre in soluzione acquosa; esso si scompone in potassio al polo negativo ed NO_3 al polo positivo:

$$KNO_3 \rightarrow \underset{-}{K} + \underset{+}{NO_3}\,.$$

Entrambi gli ioni reagiscono con l'acqua:

All'anodo, NO_3 scompone l'acqua, si unisce con l'idrogeno di essa formando acido nitrico e mette in libertà ossigeno, che si svolge liberamente:

$$2\,NO_3 + H_2O \rightarrow 2\,HNO_3 + O\,.$$

---

(1) S'intende ammoniaca pura, allo stato liquido; e non l'ammoniaca usuale, che è soluzione di ammoniaca (gassosa) in acqua (idrato ammonico) e che si scompone in altra maniera.

Al catodo il potassio reagisce anch'esso con l'acqua, ne prende l'ossidrile per formare idrato potassico, e si svolge idrogeno:

$$2\,K + 2\,H_2O \rightarrow 2\,KOH + H_2.$$

L'effetto finale è dunque uno sviluppo d'idrogeno al catodo e di ossigeno all'anodo, nelle proporzioni come nella scomposizione dell'acqua; ma contemporaneamente attorno al catodo il liquido diventa alcalino per la formazione di KOH e attorno all'anodo diventa acido per la formazione di HNO_3.

Ciò si può provare con l'esperienza, facendo uso di un voltametro della forma della Fig. 362; la soluzione di nitrato potassico si pone in un tubo di vetro A ripiegato ad U e vi si mescola un po' di tintura di tornasole neutra; la soluzione allora assume una colorazione violacea. Si fa passare la corrente per mezzo di due elettrodi di platino, disposti nelle due branche del voltametro. Si vedrà su entrambi gli elettrodi uno sviluppo gassoso; mentre attorno all'anodo la tintura di tornasole diventa rossa (*acida*), ed attorno al catodo diventa azzurra (*basica*).

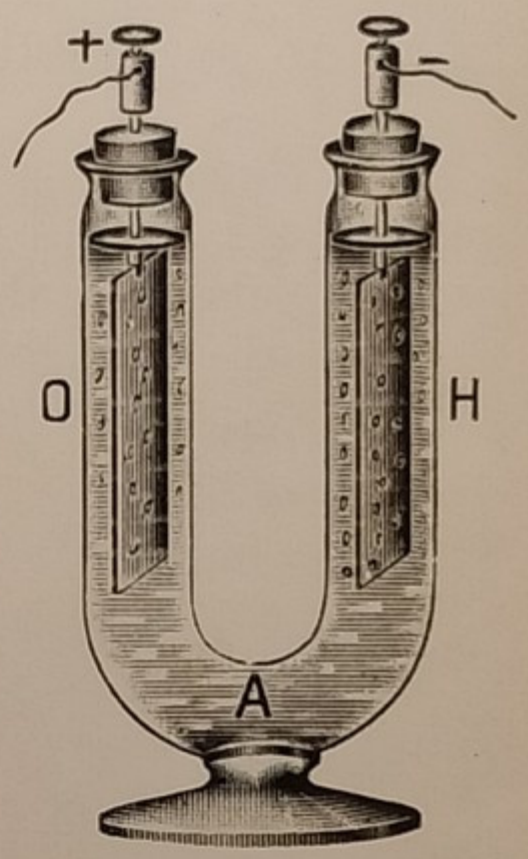


Fig. 362.

244. **Elettrolisi dell'acqua.** — Da tutti gli esempi precedenti risulta chiaramente che ciò che si scompone al passaggio della corrente non è l'acqua; ma ciò che vi è sciolto in essa. Questo fatto ci induce a dare una spiegazione più razionale della prima esperienza di elettrolisi dell'acqua.

Abbiamo detto che l'acqua pura non si scompone; ma che bisogna aggiungere un po' d'acido solforico per renderla conduttrice. Ora noi pensiamo che sia appunto l'acido aggiunto che si scomponga:

6) $$H_2SO_4 \rightarrow H_2 + SO_4.$$

L'idrogeno al catodo è quello che raccogliamo nella campanella; all'anodo SO_4 reagisce con l'acqua, come s'è visto al § 243 e forma l'ossigeno che si raccoglie nell'altra campanella; mentre si ripristina l'H_2SO_4 scomposto dalla corrente, il quale quindi rimane nella soluzione in quantità invariata. I prodotti finali sono dunque gli elementi H_2 ed O che costituiscono l'acqua.

245. **1ª legge dell'elettrolisi.** — Con l'esperienza il Faraday [1] (nel 1833), trovò le seguenti leggi:

1ª legge: *La quantità di elettrolito decomposto è proporzionale alla quantità di elettricità che vi passa.* Essa cioè non dipende dalla forma e dimensioni del voltametro e dalle condizioni fisiche dell'elettrolito, come la concentrazione, la temperatura, ecc. È questa una delle leggi più rigorose della Fisica; essa del resto non esprime che il principio della conservazione dell'energia. Ne comprenderemo meglio il significato nel § 251.

---

(1) Faraday Michael, grande fisico inglese; n. presso Londra nel 1791, m. a Richmond nel 1867.

Si chiama **equivalente elettrochimico** *di un dato elemento, la quantità di esso liberata dal passaggio di 1 coulomb di elettricità.*

Ecco gli *equivalenti elettrochimici* degli elementi più comuni:

ELEMENTI	Equivalente elettrochimico	coulomb per g.	ELEMENTI	Equivalente elettrochimico	coulomb per g.
Argento . . .	g. 0,001118	894,4	Piombo . . .	g. 0,001072	933,1
Idrogeno . . .	» 0,00001046	95582	Rame (Cu″) .	» 0,0003294	3036
Nichel	» 0,000304	3289	Sodio	» 0,0002388	4188
Ossigeno . . .	» 0,000083	12067	Zinco	» 0,0003387	2952

246. **Intensità della corrente.** — Si chiama **intensità della corrente,** *la quantità di elettricità che passa nell'unità di tempo.* Cioè l'intensità della corrente per l'elettricità corrisponde alla portata di un condotto (*litri per secondo*) per l'acqua.

Chiamando q la quantità di elettricità, t il tempo in cui passa, i l'intensità della corrente, è pertanto:

$$7) \qquad i = \frac{q}{t}, \qquad \text{ossia:} \qquad q = i\,t\,.$$

*L'***unità elettrostatica assoluta** (*u. e. s.*) **di intensità** *è quindi quella di una corrente, per la quale passa l'unità assoluta di elettricità* (§ 170) *in ogni secondo.*

*L'***unità pratica** *invece è quella di una corrente per la quale passa 1 coulomb al secondo;* si chiama **ampère,** ed equivale a 3×10^9 (*u. e. s*):

$$8) \qquad 1 \text{ ampère} = 3 \times 10^9 \text{ (}u.\ e.\ s.\text{)}.$$

Ricordando il significato di equivalente elettrochimico, potremo anche dire che:

Ampère è l'intensità di una corrente costante, che svolge mg.1,118 di argento ad ogni minuto secondo.

Ne traiamo un metodo per la misura dell'intensità della corrente; si pone nel circuito di essa un voltametro a nitrato d'argento, con elettrodi di argento; si pesa a principio il catodo e si torna a pesare dopo aver fatto passare la corrente per t secondi; se il catodo è aumentato di peso di p mg, l'intensità della corrente in ampère è stata:

$$9) \qquad i = \frac{p}{1{,}118 \times t}\,.$$

Problema. — *Quanti litri d'idrogeno si produrranno in 12 ore con una corrente dell'intensità di 500 amp.?*

Soluzione. — Si ha: $12^h = 12 \times 3600^s = 43\,200^s$.

Per la 9), in cui invece di 1,118 si ponga l'equivalente elettrochimico dell'idrogeno, si ha:

$$p = 0{,}01046 \times i\,.\,t = \text{mg. } (0{,}01046 \times 500 \times 43\,200) = \text{mg. } 225\,936.$$

D'altra parte 1 *l.* d'idrogeno pesa mg. 89 (Vol. 1° - § 163); quindi si svolgeranno:

$$\text{mg. } 225\,936 : \text{mg. } 89 = \boldsymbol{l.\ 2539.}$$

247. **2ª legge dell'elettrolisi.** — *L'intensità della corrente è uguale in tutti i punti del medesimo circuito.*

Essa è evidente, poichè l'elettricità nè si crea, nè si distrugge; quindi quella che passa ad ogni secondo a principio del circuito, passerà poi nello stesso tempo per tutti gli altri punti.

Per la verifica, si dispongono alcuni voltametri **in serie**; cioè in modo che il catodo di uno sia congiunto con l'anodo del successivo, (Fig. 363). Facendo passare la corrente si osserva che nello stesso tempo, in ciascuno di questi voltametri si svolge la stessa quantità d'idrogeno; cioè passa la stessa quantità di elettricità.

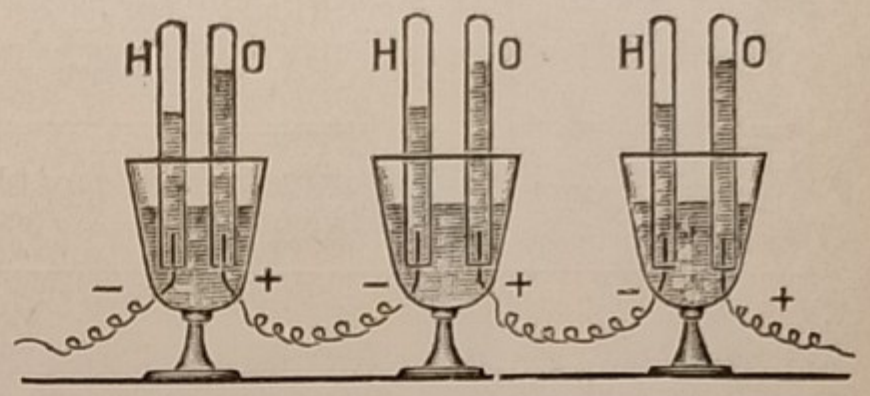


Fig. 363.

248. **3ª legge dell'elettrolisi.** — *Se un circuito si divide in più rami derivati, l'intensità della corrente nel ramo principale è eguale alla somma delle intensità nei rami derivati.*

Infatti, sempre per il principio della conservazione dell'energia, l'elettricità che passa nel ramo principale, è quella stessa che poi si distribuirà integralmente in tutti i rami derivati.

Per la verifica si dispongono tre voltametri $V - V_1 - V_2$, il primo nel ramo principale e gli altri in ciascuno di due rami in cui si divide il primo, (Fig. 364). Passando la corrente si osserva che in V si raccoglie tanto idrogeno, quanto in V_1 e V_2 insieme.

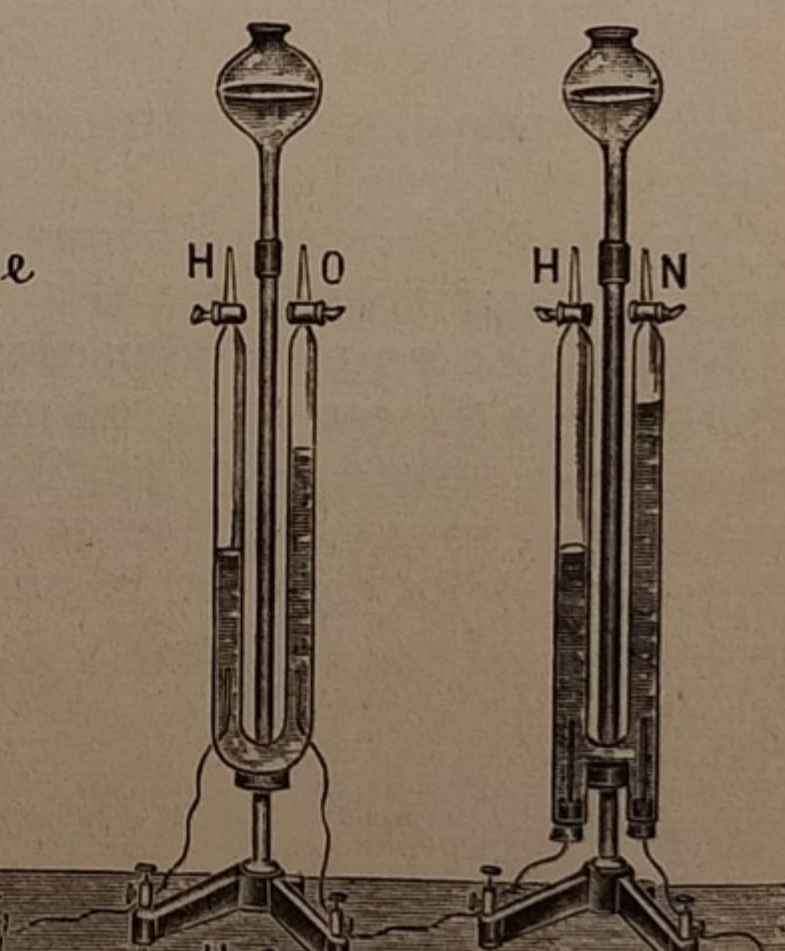


Fig. 364.

249. **4ª legge dell'elettrolisi.** — *Le quantità di sostanze diverse scomposte al passaggio di una medesima corrente, sono proporzionali ai rispettivi equivalenti chimici.*

Fig. 365.

Equivalente chimico di un elemento (da non confondersi con *elettrochimico* del § 245), è la massa di esso che può entrare in combinazione o sostituirsi con la massa 1 di idrogeno; cioè *è il rapporto tra il peso atomico dell'elemento e la sua valenza.*

Si dispongano tre voltametri in serie; in modo cioè che siano attraversati dalla stessa corrente (Fig. 365); il primo contiene acido cloridrico, il secondo acqua, il terzo ammoniaca.[1] Al passaggio della corrente, come abbiamo visto ai §§ 241-242, si svolge: nel primo voltametro idrogeno e cloro, nel secondo idrogeno e ossigeno, nel terzo idrogeno e azoto, tutti allo stato gassoso. La quantità di idrogeno è in volume eguale in tutti e tre i voltametri, come vuole la 1ª legge dell'elettrolisi; il cloro è in volume eguale, l'ossigeno in volume metà, l'azoto in volume un terzo, rispetto all'idrogeno.

Se dai volumi si calcolano i pesi di queste sostanze, essi stanno tra loro come i numeri:

10) $1\,(H) : 35{,}5\,(Cl) : 8\,(O) : 4{,}7\,(N)$. Ora si ha:

idrogeno:	peso atom.	1	valenza	1	equiv. chimico	1
cloro:	»	35,5	»	1	»	35,5
ossigeno:	»	16	»	2	»	8
azoto:	»	14	»	3	»	4,7

Quindi i rapporti dei pesi come dalla 10), sono anche i rapporti fra i rispettivi equivalenti chimici, come vuole appunto la legge.

250. **5ª legge dell'elettrolisi.** — *Il metallo si deposita al catodo, il residuo della molecola all'anodo.*

Tutti gli esempi fatti in precedenza, ne fanno conferma.

251. **Dissociazione elettrolitica.** — Diamo un cenno dell'*ipotesi di Arrhénius*[2] o *della* **dissociazione elettrolitica,** che oggi meglio spiega i fenomeni dell'elettrolisi.

Come sappiamo (§ 225), la molecola di un corpo composto è costituita da due gruppi atomici distinti, carichi di quantità di elettricità eguali ma di segno contrario; essi sono gli **ioni.** Sciogliendo il composto nell'acqua una parte delle molecole si scompone, *si dissocia,* nei suoi ioni. Così ad es., sciogliendo nell'acqua il solfato di rame ($CuSO_4$), alcune delle molecole di esso si dissociano negli ioni Cu^+ ed SO_4^-, che si separano e vagano liberi nella soluzione. Le cause di questa dissociazione sono varie: il calore, l'adesione tra solvente e soluto, ma specialmente il cozzo delle molecole tra di loro, ecc. La dissociazione è favorita dal fatto che la *costante dielettrica* (§ 188) dell'acqua ha un valore molto elevato, 80 volte quello dell'aria; cioè (ricordando, § 188, che la costante dielettrica è l'inversa del coefficiente k della legge di Coulomb, § 169), i corpi elettrizzati, e perciò anche gli ioni della molecola, si attirano nell'acqua con una forza 80 volte minore che nell'aria.

La conducibilità elettrica degli elettroliti è dovuta appunto alla presenza di tali ioni; nella benzina, ad es., la cui costante dielettrica è molto piccola, la dissociazione non avviene; quindi le soluzioni saline nella benzina sono isolanti e per esse non vi è elettrolisi.

---

(1) Vedasi nota del § 242.

(2) Arrhénius Svante, fisico dell'Università di Stoccolma; n. a Upsala nel 1859, m. ivi nel 1927. La teoria della dissociazione elettrolitica è del 1887.

La percentuale di molecole dissociate dipende dalla natura del composto disciolto e dalle sue condizioni fisiche: *temperatura*, *concentrazione*, ecc.; ma per una data temperatura e concentrazione e per una data sostanza, è un numero costante; inoltre, più la soluzione è diluita e maggiore è la percentuale delle molecole dissociate; nelle soluzioni molto diluite la dissociazione è completa, cioè *tutte* le molecole sono dissociate.

Ciò posto, immergiamo nella soluzione di $CuSO_4$ due elettrodi, in comunicazione coi due poli di una pila; gli ioni Cu^+ positivi sono attratti dal catodo, e gli ioni SO_4^- negativi dall'anodo; venuti in contatto con gli elettrodi gli ioni perdono le loro cariche (neutralizzate da quelle degli elettrodi) e si rendono liberi, depositandosi sugli elettrodi o dando luogo alle reazioni secondarie (§ 243). Per ogni coppia di ioni depositati, si dissocia subito una nuova molecola e si forma una nuova coppia di ioni liberi; in modo da mantenere costante il numero degli ioni dissociati.

Il passaggio dell'elettricità attraverso l'elettrolito è quindi dovuto al trasporto dell'elettricità dallo sciame di ioni che si muovono in esso (da cui il loro nome) ed alla cessione di tale carica agli elettrodi; e poichè ogni ione ha una carica fissa di elettricità, la quantità di elettricità trasmessa nel circuito è proporzionale al numero degli ioni che si depositano; *con ciò si spiega la 1ª legge dell'elettrolisi.*

Sappiamo che gli ioni positivi sono quelli dei metalli (§ 225); questi perciò sono sempre attratti dal catodo; così si spiega la 5ª legge, (§ 250).

All'obiezione che non si scorgono questi ioni liberi nella soluzione, si risponde osservando che si tratta di ioni elettrizzati, che quindi non hanno le proprietà fisiche, chimiche, organolettiche, che acquistano allorchè si depositano sugli elettrodi. Così, gli ioni Cu^+ che sono nella soluzione, *perchè elettrizzati, non hanno l'apparenza e le proprietà del rame ordinario*, e possono vagare invisibili nella soluzione; quando, venuti in contatto con il catodo, perdono la loro carica elettrica, diventano rame ordinario e sotto tale aspetto lo vediamo depositarsi sull'elettrodo.

252. **Carica dell'elettrone.** — Dalla 4ª legge dell'elettrolisi (§ 249) risulta che tutti gli ioni monovalenti portano la stessa carica elettrica. qualunque sia la loro natura; che la carica di un ione bivalente, trivalente... è doppia, tripla... della carica di un ione monovalente. Cioè le cariche elettriche che si manifestano nell'elettrolisi sono secondo multipli di una carica elementare, che è quella di un ione monovalente. Come da un concetto analogo della *Chimica* (la legge delle proporzioni definite), Dalton pervenne all'ipotesi degli atomi indivisibili, così ora pensiamo che la carica dell'ione monovalente sia l'**atomo di elettricità,** indivisibile; cioè non vi può essere una quantità di elettricità minore di quella di un ione monovalente.

Noto l'equivalente elettrochimico dell'argento (o di altro elemento monovalente), è facile calcolare che la quantità di elettricità necessaria a svolgere con l'elettrolisi *1 grammo-atomo* di argento (o di altro elemento monovalente), cioè g. 107,7 (circa) di argento, è:

$Q = 96490$ *coulomb.* Questo numero dicesi la **costante di Faraday.**

Ora sappiamo che il numero di atomi contenuti in un *grammo-atomo* di elemento monovalente, cioè il *numero di Avogadro*, è (§ 218): $N = 60{,}6 \times 10^{22}$. Quindi la carica di un ione monovalente è:

$$11) \qquad q = \frac{Q}{N} = \frac{96\,490}{60{,}6 \times 10^{22}}\ coulomb = 1{,}59 \times 10^{-19}\ coulomb.$$

Questa è quindi anche la carica di un *elettrone*, come appunto abbiamo visto nel § 220.

253. **Teoria elettrolitica della pila.** — Crediamo utile, ora che conosciamo le azioni chimiche della corrente, dare un cenno di un'altra **teoria chimica,** sorta dopo il Volta, per spiegare la produzione di elettricità nella pila.

Nella prima metà del secolo scorso, in cui si fondava e si ribadiva il principio della conservazione dell'energia, parve inammissibile che il semplice contatto di due metalli, per il quale niente si consuma e niente si trasforma, potesse generare l'energia estrinsecata con la corrente della pila. D'altra parte nella pila avvengono reazioni chimiche (corrosione dello zinco, diminuzione dell'acido, ecc.) che potevano meglio spiegare l'origine della corrente. Si suppose cioè che per la reazione di un elettrolito con un metallo si origini una *f.e.m.*: l'elettrolito si elettrizza positivamente ed il metallo attaccato negativamente.

Con tale ipotesi è facile spiegare tanto le tre esperienze di Volta (§ 236), quanto il funzionamento della pila. Limitandoci a questa, allorchè si immergono in acqua acidulata due lamine $Zn - Cu$, lo zinco attaccato dall'acido si elettrizza negativamente e forma il polo — della pila; l'acido positivamente e comunica la sua elettricità al rame (inattaccato), che si elettrizza positivamente e forma il polo + della pila. Fra zinco e rame si stabilisce quindi una differenza di potenziale, che genera la corrente allorchè si chiude il circuito.

In conclusione dunque, secondo la teoria del contatto la sede della f.e.m. sarebbe nel contatto del reoforo di rame con la lastra di zinco della pila; secondo la teoria chimica sarebbe nel contatto del metallo attaccabile (zinco) con l'acido.

Furono eseguite numerose esperienze per convalidare l'una o l'altra delle teorie. Oggi riteniamo vere entrambe; cioè che il contatto sia la causa che origina la f.e.m. (§ 238), ma questa si annullerebbe subito, come nella scarica di un condensatore, se non fosse poi mantenuta dall'azione chimica.

Ricordiamo infatti (§ 240), che la corrente elettrica nell'interno della pila va dallo zinco al rame; la pila perciò è come un voltametro, di cui l'anodo è lo zinco, il catodo il rame, e l'elettrolito l'acido solforico. Questo si scompone in H_2^+ che va sul rame ed SO_4^- sullo zinco; cedono questi ioni agli elettrodi le loro cariche, che sono appunto quelle che costituiscono la corrente elettrica. Questa perciò viene ottenuta a spese dell'acido e dello zinco, che si consumano in quantità proporzionale alla quantità di elettricità fornita dalla pila.

Una pila pertanto deve necessariamente essere formata da:

1. Un elettrodo attaccabile (*polo negativo*).
2. Un elettrolito che lo attacchi (*sostanza eccitante*).
3. Un elettrodo inattaccabile (*polo positivo*).

Problemi da risolvere.

1. Quanto rame si può depositare in un'ora con una corrente di 15 amp.?
2. Una corrente ha decomposto in 15 minuti g. 2,5 d'acqua; qual'è la sua intensità?
3. Che intensità deve avere una corrente per ottenere 1 m³ d'idrogeno in 10 ore? Con una corrente di 100 amp. quante ore occorrerebbero?
4. Una corrente si divide in due branche, contenenti ciascuna un voltametro ad acqua acidulata; si raccolgono in 10m nel primo 100 cm³ e nel secondo 250 cm³ di idrogeno. Calcolare le intensità della corrente nei rami derivati e nel ramo principale.
5. Si dispongono tre voltametri in serie, contenenti: il primo acqua acidulata, il secondo nitrato d'argento, il terzo solfato di rame. Se una data corrente, passando per 15m, svolge nel primo voltametro *l.* 5 d'idrogeno, calcolare i pesi di ossigeno, argento, rame, svolti rispettivamente nei tre voltametri, e l'intensità della corrente impiegata.
6. Si vuol ricoprire una sfera di raggio r = cm. 20, con un deposito di rame di spessore d = mm. 0,2 in 5 ore. Quale dev'essere l'intensità della corrente?
7. Spiegare le tre esperienze di Volta (§ 236), in base alla teoria chimica della pila (§ 253).

Applicazioni dell'elettrolisi.

254. **Estrazione e raffinazione dei metalli.** — Si può estrarre un metallo da un suo composto, sciogliendo questo nell'acqua e scomponendolo con la corrente elettrica: il metallo si raccoglie sul catodo, (§ 250).

Questo procedimento non conviene per i metalli usuali, di cui raramente si trovano in natura sali minerali solubili; mentre se si dovessero trasformare chimicamente dapprima i minerali insolubili in altri composti solubili, sarebbe troppo costosa l'estrazione del metallo, e non converrebbe applicarla in luogo dei processi metallurgici ora impiegati.

Il procedimento però conviene, ad es., per l'estrazione dell'oro, la cui scarsità non permette l'applicazione dei processi metallurgici ordinarî. Così al Transwaal l'oro si estrae macinando la pietra che lo contiene invisibile in piccola quantità; si imbeve la polvere ottenuta con cianuro di potassio che non attacca la polvere della pietra, ma attacca l'oro trasformandolo in cianuro d'oro; si filtra e si raccoglie la soluzione, dalla quale, per elettrolisi, si ricava l'oro. Pare che questo processo sia più vantaggioso di quello dell'amalgamazione con mercurio, seguito altrove, e noto da secoli.

Parimenti il procedimento conviene per l'estrazione dell'alluminio; questo è abbondantissimo in natura, entrando nella costituzione delle argille. Ma i minerali di alluminio sono refrattarî; quindi non si scompongono nei forni ordinarî e non sono applicabili perciò i processi metallurgici usuali. Si ricorre al forno elettrico (§ 288), che permette di raggiungere enormi temperature, tali da fondere il minerale di alluminio; esso, fuso, diventa conduttore come per soluzione, quindi è suscettibile di elettrolisi; così si scompone e se ne estrae il metallo contenuto.

È per questo metodo che oggi l'alluminio costa relativamente poco, e se ne fa un'applicazione così grande per tanti usi della vita pratica.

Ma se non conviene l'estrazione dei metalli con l'elettrolisi, conviene la loro raffinazione; infatti i metalli ottenuti coi processi metallurgici ordi-

narî, sono alquanto impuri e inadatti ad alcuni usi in cui si richiede il metallo puro.

Un metallo impuro si depura mettendolo come anodo in una soluzione di un suo sale. Al passaggio della corrente dal sale si deposita e si raccoglie al catodo il metallo puro, ed il sale si ripristina a spese dell'anodo impuro, come abbiamo visto al § 243 - 2 per il solfato di rame; le impurità del metallo rimangono nella soluzione.

Così si fabbrica il **rame elettrolitico,** che occorre per i fili delle condutture elettriche.

Fig. 366.

255. **Fabbricazione di sostanze chimiche.** — Abbiamo visto che con l'elettrolisi dell'acqua si possono ottenere l'**ossigeno** e l'**idrogeno,** molto adoperati nella pratica. La Fig. 366 mostra la lunga serie di voltametri adoperati in uno Stabilimento, per la fabbricazione elettrolitica dell'idrogeno.

Si fabbrica con l'elettrolisi anche la **soda,** che è il **carbonato di sodio** (Na_2CO_3). Basta perciò scomporre, in voltametri speciali, una soluzione di sal da cucina (*cloruro di sodio:* $NaCl$); esso si scompone in sodio al catodo e cloro all'anodo:

$$NaCl \leftrightarrows Na + Cl.$$

Il cloro si rende libero, e viene impiegato o direttamente per la sbiancatura della carta e dei tessuti, o impegnandolo in reazioni atte a fabbricare sali utili nella pratica. Il sodio reagisce con l'acqua:

$$Na + H_2O \rightarrow NaOH + H$$

e si forma l'*idrato sodico* o **soda caustica,** già usato nella pratica. Facendo passare una corrente di anidride carbonica nell'idrato sodico, si trasforma nella soda richiesta.

Questi processi non sono ancora troppo diffusi, per il maggior costo di produzione di queste sostanze in confronto agli altri metodi chimici applicati; ma possono qualche volta convenire, sia per utilizzare in certe ore l'energia elettrica che andrebbe altrimenti perduta, sia nel caso che il trasporto delle sostanze da lontano ne aumenti notevolmente il costo.

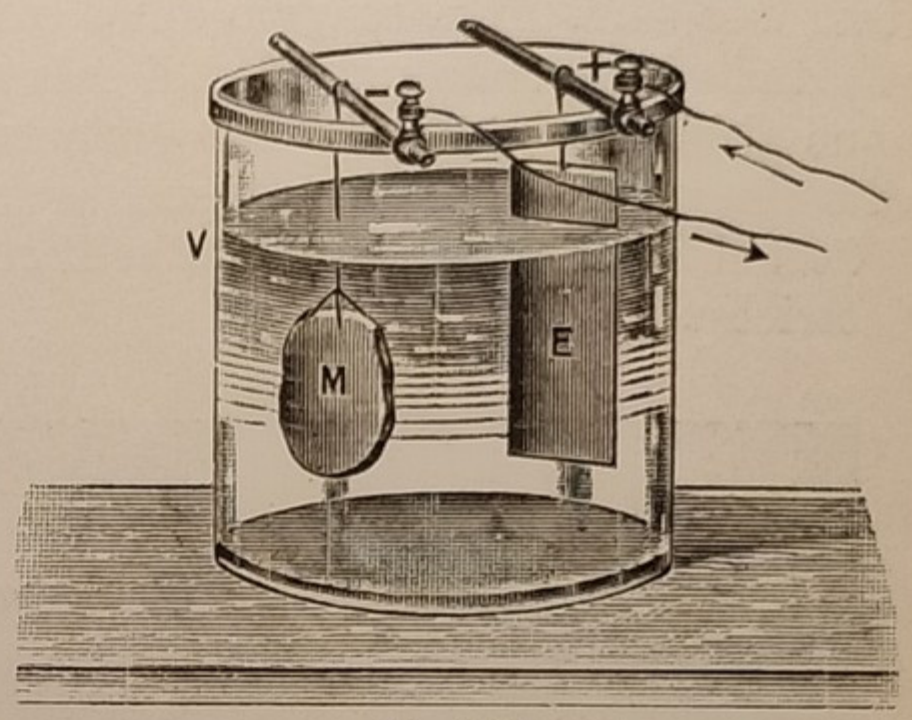


Fig. 367.

256. **Galvanoplastica.** — La **galvanoplastica** è l'arte di riprodurre un oggetto in rame, con la corrente elettrica; è stata applicata per la prima volta in Francia da M. H. Jacobi, verso la metà del secolo scorso.

Per riprodurre un oggetto, ad es. una medaglia, se ne prende un'impronta *M* con guttaperca o altra sostanza plastica; si spalma quest'impronta con uno strato impalpabile di piombaggine (*grafite*) che ne rende la superficie conduttrice dell'elettricità, pur non alterando i dettagli della figura. Indi si appende con un filo di rame dentro un *bagno* di solfato di rame, e si mette in comunicazione col polo negativo di una pila (o di altro generatore di corrente continua). Col polo positivo si fa comunicare una lastra di rame *E*, anch'essa immersa nel bagno, dirimpetto all'impronta, (Fig. 367). Passando la corrente, per la solita reazione (§ 243 - 2), il rame decomposto dal solfato di rame si deposita sull'impronta, e vi forma una crosta; quando questa ha raggiunto lo spessore voluto, la si distacca e si ottiene la riproduzione cercata.

Fig. 368.

Questo processo è utilissimo per la fedeltà con cui è riprodotto l'oggetto; si è riusciti a riprodurre le iridescenze della madreperla, dovute a microscopiche striature (§ 100) ed alcune delicatissime ali di insetti. Si applica per la riproduzione dei *clichés*, per la stampa dei francobolli ed altre carte valori, che devono essere assolutamente identici nel disegno per evitarne la falsificazione. Si fanno pure con la galvanoplastica fregi ed ornamenti per mobili; e si sono riprodotte persino statue intere da modelli di gesso,

come la *Statua della Libertà* che illumina il porto di New-York, alta 42 m. La Fig. 368 mostra un gruppo di statue sulla facciata dell'Opéra di Parigi, ottenuta per galvanoplastica; la grandezza delle figure risalta per confronto con la persona riprodotta in basso.

257. **Galvanostegia.** — La galvanostegia è l'arte di ricoprire un metallo con altro più nobile, per mezzo della corrente elettrica: ad es. *la nichelatura*, *l'argentatura*, ecc.

Per nichelare un oggetto, lo si liscia e si sgrassa; indi si immerge in un bagno di un sale di nichel (ordinariamente in una soluzione di solfato ammoniacale di nichel) e si fa comunicare al solito col polo negativo di una pila o altro generatore di corrente; come anodo si adopera una lastra di nichel. Passando la corrente si ha un risultato analogo che per il rame (§ 243 - 2); cioè si deposita nichel sull'oggetto da nichelare, l'anodo si consuma ed il bagno rimane inalterato. Quando lo strato di nichel ha raggiunto lo spessore sufficiente, si toglie l'oggetto dal bagno e si lucida coi processi meccanici usuali.

Con un bagno di sale di argento ed anodo di argento, si argenta, ecc.

In tutti questi processi, detti **galvanici,** occorre che la corrente non sia nè troppo forte nè troppo debole; altrimenti il deposito metallico non ha la compattezza e l'aderenza necessaria. Si chiama **densità della corrente** l'intensità per unità di superficie; questa densità varia a secondo della natura del metallo depositato, ed è stabilito dalla pratica.

Oggi sono sparsi nella vita pratica innumerevoli oggetti nichelati ed argentati, come: posaterie, vasi d'ornamento, ecc.

Polarizzazione.

258. **Polarizzazione della pila.** — La pila di Volta non è adatta a fornire corrente per molto tempo; dopo pochi momenti che il circuito è chiuso la corrente s'indebolisce e rapidamente può anche annullarsi. Si dice che **la pila si polarizza.**

La spiegazione di tale fatto è la seguente: Consideriamo un elemento voltaico; cioè una pila formata da una lastra di zinco ed una di rame, immerse in acqua acidulata con acido solforico, (Fig. 369). Chiudendo il circuito, come abbiamo visto nel § 253, si svolge sull'elettrodo di rame l'*ione* H_2^+. Infatti, facendo l'esperienza, è sul rame che vediamo svolgersi bollicine gassose; e non sullo zinco come a prima vista ci saremmo aspettati.

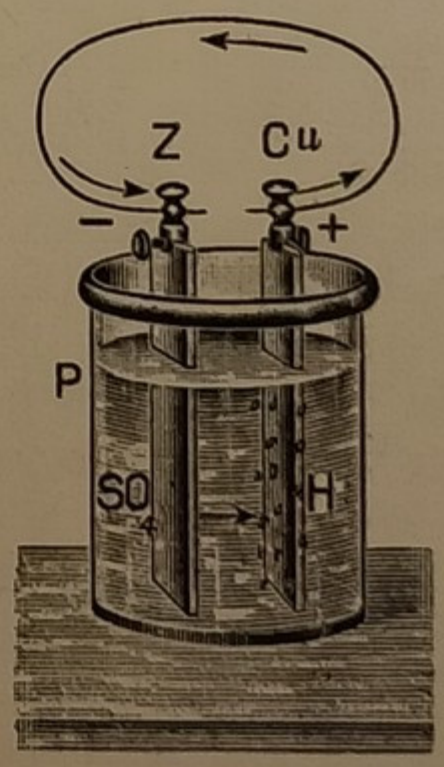


Fig. 369.

Ora, l'idrogeno a contatto del rame genera una forza elettromotrice, detta **forza elettromotrice di polarizzazione,** che è contraria a quella zinco-rame della pila. Il valore di essa dipende dalle condizioni fisiche dell'acqua acidulata (concentrazione, temperatura, pressione, ecc.); in condizioni ordinarie è di circa 1,5 *volt*; onde contrasta ed annulla la f.e.m. della pila, ch'è minore. Da ciò la causa dell'indebolimento della pila.

Se vogliamo evitare questo inconveniente, dobbiamo impedire che l'idrogeno si svolga in contatto del rame, o di altro elettrodo che lo sostituisca. Il miglior modo di raggiungere questo scopo è di circondare l'elettrodo positivo della pila con sostanze che reagiscono chimicamente con l'idrogeno, eliminandolo. Tali sostanze si chiamano **depolarizzanti** e le pile in cui si applicano, **pile depolarizzate.** Descriviamo le più usate di queste.

259. **Pila di Daniell.** — La pila di Daniell [1] (1836), è formata da un vaso *V*, usualmente di vetro, contenente acqua acidulata con acido solforico al 10%; in questa è immersa una lastra o un manicotto *Z* di *zinco amalgamato* (Fig. 370). L'amalgamazione dello zinco si fa pulendone e ravvivandone con acido la superficie e spalmandolo con mercurio, in modo che venga ben lucido come se fosse stagnato; essa ha per scopo d'impedire che lo zinco venga attaccato e corroso dall'acido a circuito aperto, cioè senza sviluppo di corrente; nel qual caso si consumerebbe inutilmente in poco tempo.

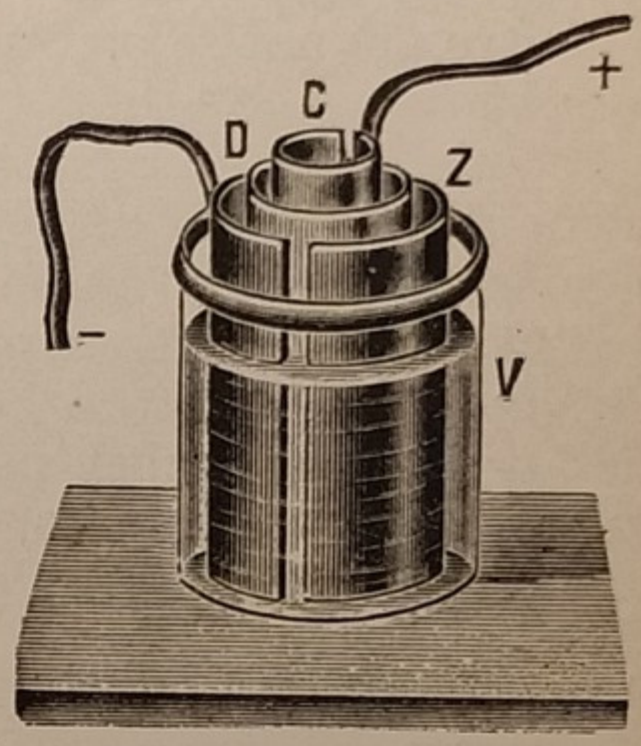


Fig. 370.

Nell'acqua acidulata è pure contenuto un *vaso poroso D* di porcellana non verniciata, contenente una soluzione satura di solfato di rame ed una lastra di rame *C*.

L'idrogeno che si svolge sul rame reagisce col solfato di rame, formando acido solforico e rame:

$$H_2 + CuSO_4 \leftrightarrows H_2SO_4 + Cu.$$

L'acido solforico per diosmosi (Vol. 1° - § 216) esce dal vaso poroso e ripristina l'acido scompostosi sullo zinco; il rame si deposita sull'elettrodo *C* ingrossandolo, senza inconvenienti. Il solfato di rame va consumandosi; per mantenere la soluzione satura si aggiunge alquanto solfato di rame solido, che va man mano sciogliendosi.

In questa pila non avvengono così altre modificazioni che la formazione di solfato di zinco attorno allo zinco, che rimane in soluzione nell'acqua acidulata; pertanto la f.e.m. si mantiene costante più che in ogni altra pila. Però il valore di questa non è molto elevato; è di circa 1,1 *volt*, e la resistenza del solfato di rame al passaggio della corrente è notevole. Quindi la corrente non è molto intensa. Questa pila pertanto si adopera allorchè si vuole una corrente costante per molte ore, ma di intensità non grande.

260. **Pila di Bunsen.** — La pila di Bunsen [2] (1842), ha la medesima forma della precedente; ma invece del solfato di rame nel vaso poroso vi è acido nitrico concentrato; ed invece di rame, che sarebbe attaccato dal-

---

(1) Daniell John, chimico inglese; n. a Londra nel 1790, m. ivi nel 1845.
(2) Bunsen Robert, chimico tedesco; n. a Gottinga nel 1811, m. a Heidelberg nel 1899.

l'acido nitrico, come elettrodo positivo vi è una lastra di carbone [1]. La Fig. 371 mostra questa pila nel suo insieme e nelle parti che la compongono (*F vaso di vetro, Z zinco; V vaso poroso, C lastra di carbone*).

L'idrogeno in questa pila scompone l'acido nitrico, con formazione di acqua ed anidride nitrosa-nitrica:

$$H_2 + 2\,HNO_3 \rightarrow 2\,H_2O + N_2O_4\,.$$

La f. e. m. di questa pila supera all'inizio i 2 *V*, e l'acido nitrico è buon conduttore dell'elettricità; quindi la corrente è intensa e può raggiungere una diecina di ampère. Ma la corrente non è costante, poichè l'acqua che si forma dall'acido nitrico lo diluisce sempre più e lo rende sempre meno adatto a reagire con l'idrogeno. La pila cioè va lentamente polarizzandosi; essa quindi serve nel caso in cui si richieda una corrente energica per poche ore.

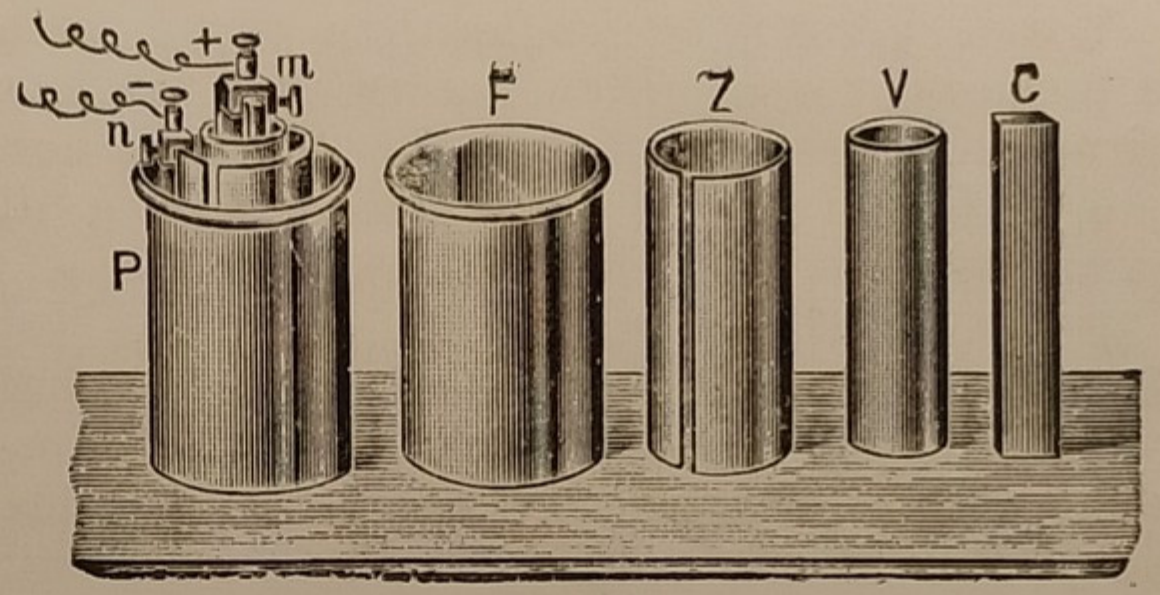


Fig. 371.

Questa pila infine, ha l'inconveniente che l'anidride nitrosa nitrica, che è un gas, si diffonde nell'ambiente, provocando corrosione dei metalli che vi si trovano e disturbi alla respirazione delle persone. Quindi bisogna tenerla sotto una cappa o fuori della finestra, portando nella stanza in cui si lavora solo i reofori della corrente.

261. **Pila di Poggendorff.** — Ad evitare gli inconvenienti dell'acido nitrico della pila precedente, il Poggendorff lo sostituì con una miscela di bicromato di potassio ed acido solforico con acqua, conservando nel resto gli elettrodi e la forma della pila di Bunsen. Il bicromato cede anch'esso ossigeno, che fissa l'idrogeno della pila, depolarizzandola.

Ma l'azione del bicromato non è così energica come quella dell'acido nitrico, onde anche questa pila serve solo per correnti di non lunga durata.

262. **Pila di Grenet o a bottiglia.** — Il bicromato di potassio non attacca lo zinco e può pertanto rimanere in contatto con questo; cioè si può abolire il vaso poroso e formare una **pila ad un solo liquido.** È questa la **pila di Grenet,** chiamata anche **pila a bottiglia** per la sua forma. È costituita di un recipiente di vetro a forma di bottiglia, con largo collo (Fig. 372), contenente una soluzione di acqua con acido solforico dal 10 al 20%, e bicromato di potassio al 10%. Al coperchio sono fissate due lastre di carbone che formano insieme il polo + della pila; se ne prende la comunicazione

---

(1) Una volta si adoperava il *carbone di storta*, compatto, resistente, buon conduttore dell'elettricità. Oggi si fa artificialmente, agglomerando e comprimendo coke in polvere con catrame, e ricuocendo il tutto ad alta temperatura.

per mezzo di un serrafilo S. Fra i due carboni può scorrere una lastra di zinco Z, tenuta da una bacchetta di ottone B; forma il polo — della pila, in comunicazione con un altro serrafilo S'.

Solitamente lo zinco è sollevato, fuori del liquido, e la pila non funziona. Quando si vuole metterla in azione si abbassa lo zinco, in modo che s'immerga nel liquido sottostante.

Questa pila è comoda perchè si può tenere in uno scaffale quanto tempo si vuole, sempre pronta a funzionare; la corrente fornita può essere anche assai intensa, per la mancanza del vaso poroso, che nelle altre pile è forte ostacolo al passaggio della corrente; ma essa si polarizza alquanto. Quindi la corrente non può essere di lunga durata. La f.e.m. è di circa 1,8 V.

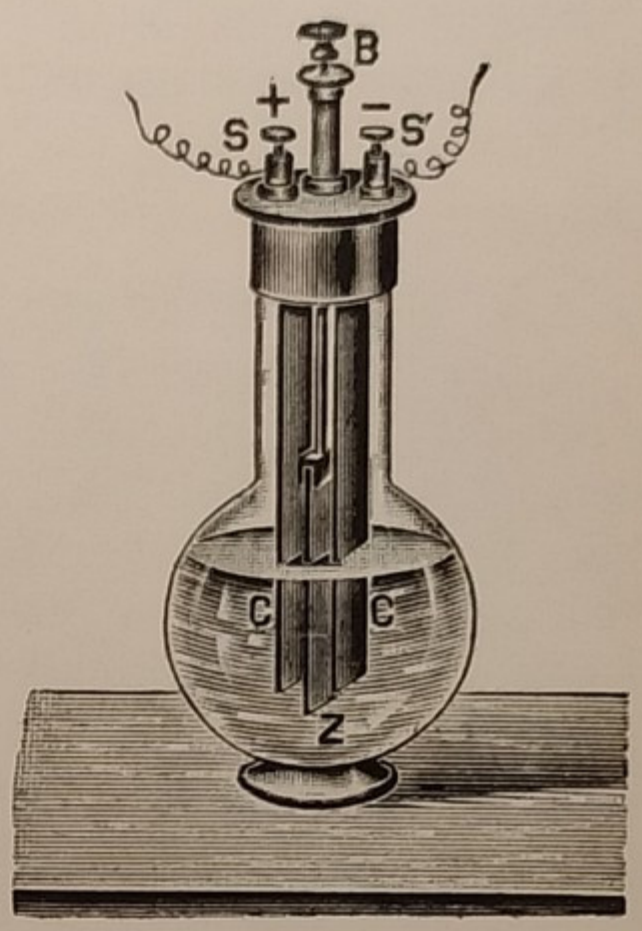


Fig. 372.

263. **Pila Leclanché.** — Le pile oramai vanno scomparendo dall'uso, per il diffondersi della produzione della corrente elettrica con altri mezzi meccanici più convenienti, che studieremo in seguito. Si trova tuttavia ancora molto diffusa la **pila Leclanché**, (1) usata nelle suonerie elettriche.

Essa è formata da un vaso di vetro, spesso di forma quadrangolare (Fig. 373), nel quale è contenuto un bastoncino di zinco amalgamato Z, immerso in una soluzione di *sale ammoniaco* (cloruro di ammonio: NH_4Cl) al 15 %. Nello stesso liquido è contenuto un vaso poroso o un sacchetto di tela, in cui è posto l'elettrodo positivo di carbone C, circondato da una miscela di granelli di coke e *biossido di manganese* (MnO_2). Quest'ultimo è il depolarizzante; mentre il coke si aggiunge per dare maggiore conducibilità alla miscela che circonda il carbone.

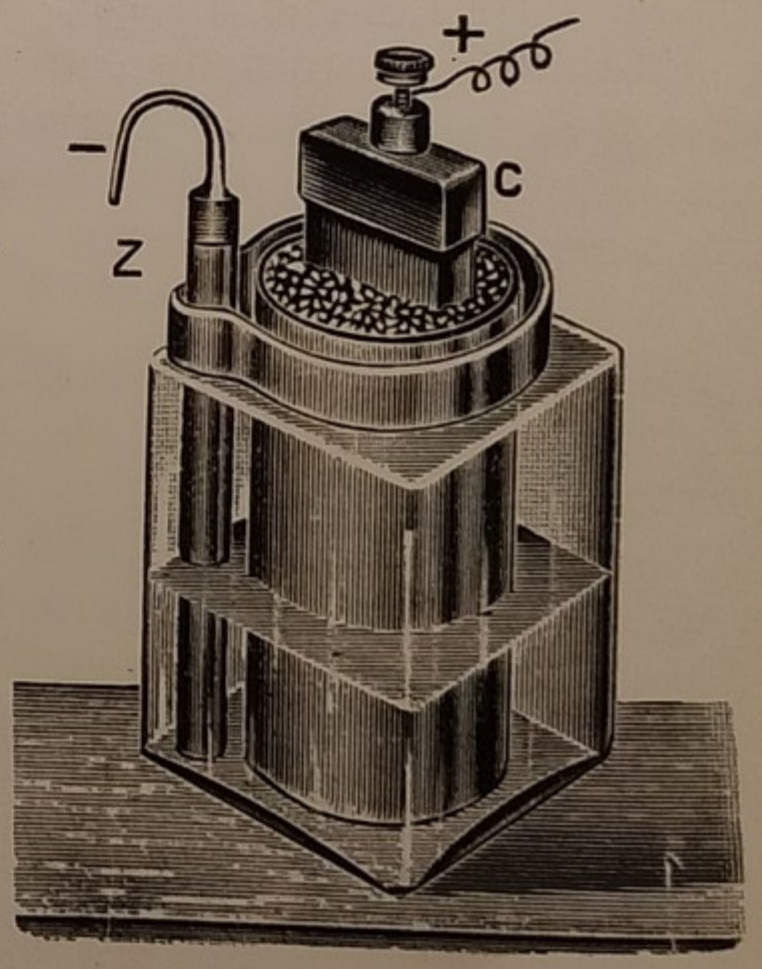


Fig. 373.

Per l'azione della corrente il cloruro di ammonio si scinde in ammoniaca, cloro ed idrogeno:

$$NH_4Cl \rightarrow NH_3 + Cl + H.$$

Il cloro si svolge sullo zinco e l'attacca, producendo cloruro di zinco, che rimane sciolto nell'acqua; l'idrogeno si svolge sul carbone, ove reagisce col biossido di manganese, formando acqua e perossido di manganese:

$$H_2 + 2\,MnO_2 \rightarrow H_2O + Mn_2O_3.$$

---

(1) Leclanché George; n. a Parigi nel 1839, m. ivi nel 1882.

Poichè questa reazione è lenta, la pila si depolarizza solo se fornisce corrente debole, di breve durata, ad intervalli; ciò è appunto quanto si richiede per le suonerie; mentre ha il vantaggio di poter rimanere in funzione per molti mesi. La sua f.e.m. è di circa 1,4 *V*.

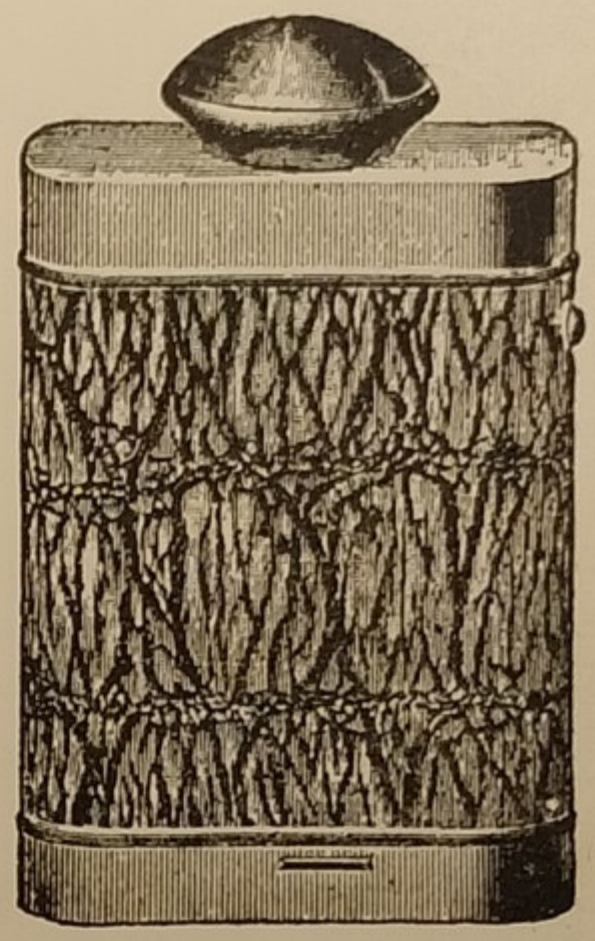


Fig. 374.

264. **Pile a secco.** — Sul tipo della Leclanché, con l'aggiunta di altri ingredienti che ne migliorano il funzionamento, si costruiscono oggi **pile chiuse**, dette impropriamente **a secco**, facilmente trasportabili; poichè il liquido ne è immobilizzato e non può uscire neanche rovesciando la pila. Parimenti si costruiscono piccole batterie tascabili, adatte ad accendere lampadine elettriche di piccola intensità, (Fig. 374).

Per tutte le pile valga l'osservazione che per la 1ª e 2ª legge di Volta (§ 237), la f.e.m. non dipende dalla loro dimensione, ma solo dalla qualità degli elettrodi e delle sostanze impiegate. Aumentando la grandezza della pila cresce però l'intensità della corrente, perchè diminuisce la resistenza offerta nell'interno della pila al passaggio dell'elettricità, come meglio vedremo in seguito.

Accumulatori.

265. **Accumulatori elettrici.** — Gli accumulatori sono apparecchi che servono ad accumulare l'elettricità, per restituirla sotto forma di corrente. Oggi sono quasi esclusivamente adoperati gli **accumulatori a piombo**, inventati da Planté [1] nel 1881, basati sulla trasformazione chimica della superficie del piombo con la corrente elettrica.

Supponiamo di scomporre l'acqua acidulata, mettendo in comunicazione i poli di una pila *P* [2] con due elettrodi di piombo *A* e *C*, immersi in acqua e acido solforico, (Fig. 375). I due elettrodi di piombo, come vedremo tra poco, sono già ricoperti di uno strato di solfato di piombo. Per la scomposizione dell'acido solforico contenuto nell'elettrolito in cui sono immersi gli elettrodi, al polo + si sviluppa l'*ione* SO_4, che reagisce con il solfato di piombo che ricopre l'elettrodo, secondo la reazione:

$$Pb\,SO_4 + SO_4 + 2\,H_2O \rightarrow \mathbf{Pb\,O_2} + 2\,H_2SO_4.$$

La superficie dell'elettrodo positivo si ricopre perciò in uno strato di *biossido di piombo*, di colore bruno (castano). Al polo — si sviluppa l'*ione* H_2, che reagisce anch'esso con il solfato di piombo che ricopre l'elettrodo, secondo la reazione:

$$Pb\,SO_4 + H_2 \rightarrow \mathbf{Pb} + H_2SO_4.$$

---

(1) Planté Raymond; n. a Orthez nel 1834, m. a Parigi nel 1889.

(2) In questa figura e in seguito un elemento di pila si rappresenta schematicamente con due lineette: la più grossa e più corta rappresenta il polo + (carbone), l'altra il polo — (zinco). Nella Fig. 375, *P* rappresenta una pila con due elementi.

La superficie dell'elettrodo negativo si ricopre perciò di uno strato di *piombo puro spugnoso*, di colore ardesia.

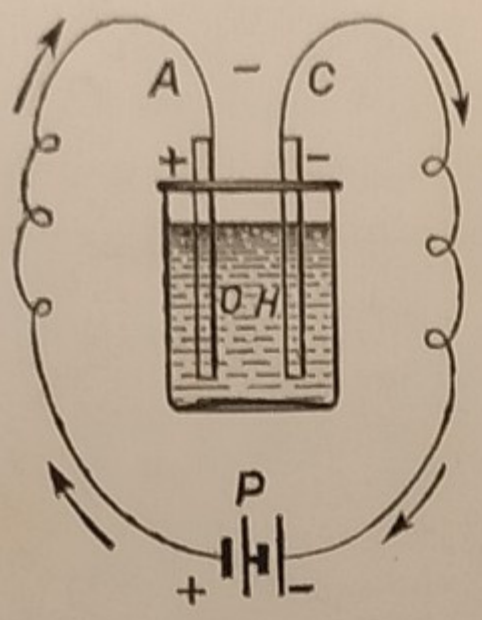


Fig. 375.

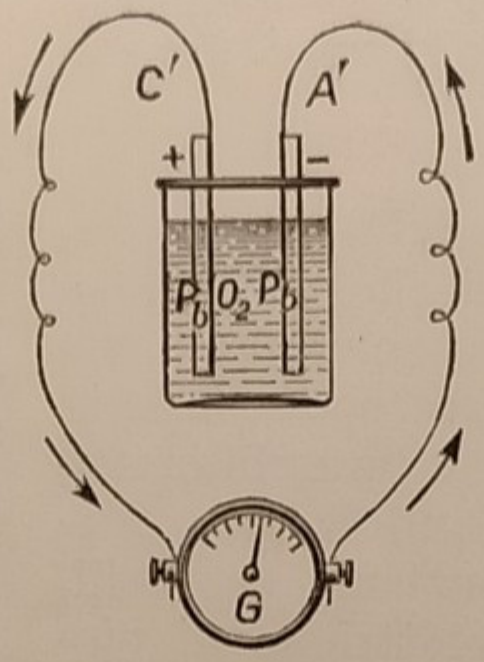


Fig. 376.

Questa prima fase è quella di **carica** dell'accumulatore, durante la quale siamo noi che somministriamo corrente.

Riepilogando: *durante la carica l'elettrodo positivo si ricopre di biossido di piombo, quello negativo di piombo spugnoso, e il liquido in cui sono immersi diviene più concentrato di acido solforico.*

Togliamo ora la comunicazione con la pila, e congiungiamo i due elettrodi di piombo con un circuito esterno qualsiasi *G*, (Fig. 376): si ottiene una corrente elettrica dovuta al fatto, che l'elettrodo ricoperto di piombo spugnoso funziona come lo zinco di una pila, l'altro come polo positivo ed il biossido di piombo come depolarizzante.

Le reazioni in questa seconda fase sono le seguenti: all'elettrodo positivo in modo analogo a quello visto nel § 258, si svolge l'*ione* H_2 che reagisce con il biossido di piombo dell'elettrodo, secondo la reazione:

$$Pb\,O_2 + H_2 + H_2SO_4 \rightarrow \mathbf{Pb\,SO_4} + 2\,H_2O.$$

All'elettrodo negativo si svolge l'*ione* SO_4 che reagisce con il piombo spugnoso dell'elettrodo, secondo la reazione:

$$Pb + SO_4 \rightarrow PbSO_4.$$

Questa seconda fase è quella di **scarica**, durante la quale: *entrambi gli elettrodi si ricoprono di solfato di piombo, e il liquido in cui sono immersi diviene più diluito.*

Si ottiene così una *corrente di scarica*, che dura finchè il piombo spugnoso e l'ossido di piombo non si sono consumati; cioè la quantità di elettricità restituita nella scarica è (teoricamente) equivalente a quella fornita nella carica.

266. **Capacità dell'accumulatore.** — Si chiama **capacità** dell'accumulatore la quantità di elettricità restituita nella scarica; essa si misura in **ampère-ora**, cioè moltiplicando il numero degli ampère di scarica per il numero delle ore ch'essa dura; *un ampère-ora = 3600 coulomb.*

La capacità dell'accumulatore evidentemente dipende dalla quantità dei depositi formati sulle lastre di piombo durante la carica. Essa aumenta:

1. Aumentando la superficie delle lastre. Per comodità in pratica, anzichè fare uso di due sole lastre, ciascuna di queste si divide in pezzi eguali e si collocano questi in un recipiente di vetro o di celluloide o di altra sostanza, disponendoli parallelamente tra di loro e alternando una lastra positiva con una negativa; perchè le lastre non si tocchino, sono separate da bacchette di vetro o da sottili diaframmi di legno. Si riuniscono poi tutte le

lastre positive fra di loro da una parte e le negative fra di loro dall'altra parte.

La Fig. 377 mostra schematicamente questa disposizione; mentre la Fig. 378 rappresenta l'accumulatore in prospettiva.

2. *Aumentando lo spessore dei depositi*; cioè facendo penetrare l'azione chimica della corrente, più profondamente che si può nell'interno del piombo. Ciò si ottiene con la così detta **formazione.**

Il Planté usava la *formazione naturale*, lenta, ottenuta caricando e scaricando l'accumulatore successivamente ogni giorno, per parecchi mesi; ogni nuova carica faceva penetrare sempre maggiormente all'interno l'azione chimica della corrente.

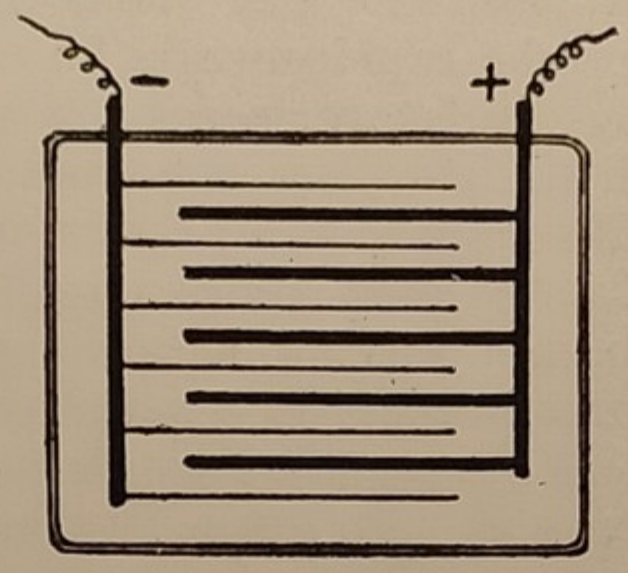


Fig. 377.

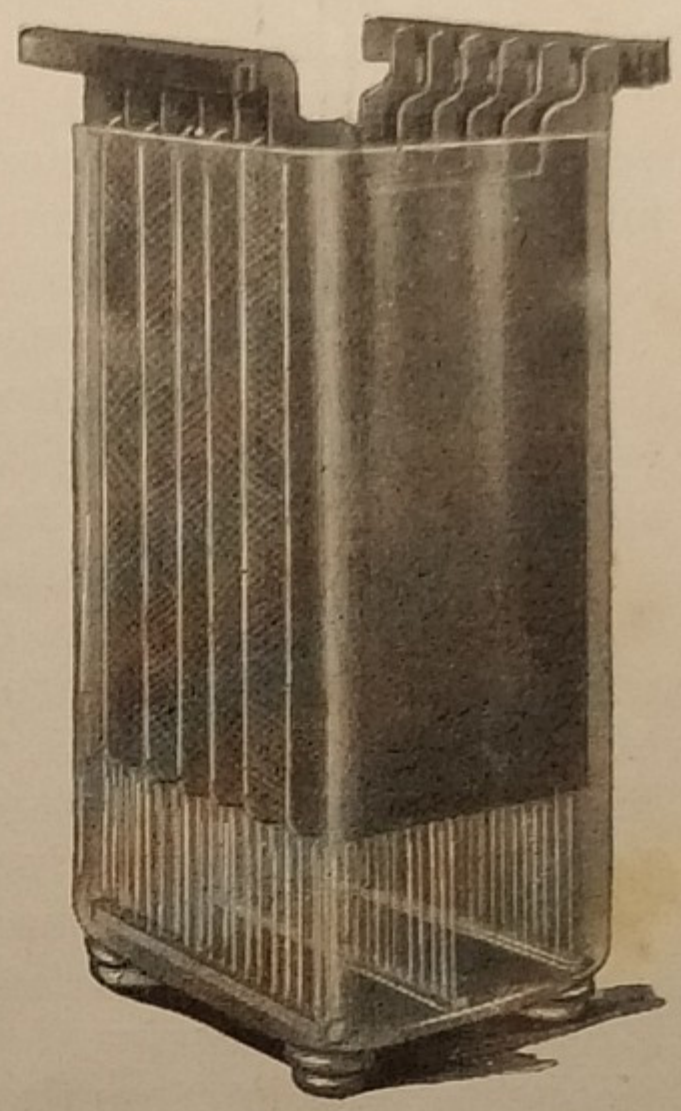


Fig. 378.

Questo processo fornisce depositi più aderenti e quindi forma lastre più solide e più durevoli; ma esige tempo e spreco di corrente, quindi eleva notevolmente il costo dell'accumulatore. Perciò si usa spesso la *formazione artificiale* o sistema Faure; per questo si adoperano lastre di piombo traforate, a graticciato (Fig. 379), nei vani delle quali si comprime una pasta di minio ed acido solforico per le lastre positive, e di litargirio ed acido solforico per le negative. Una sola carica di circa 40 ore, trasforma queste sostanze (che sono ossidi di piombo) nei depositi attivi voluti.

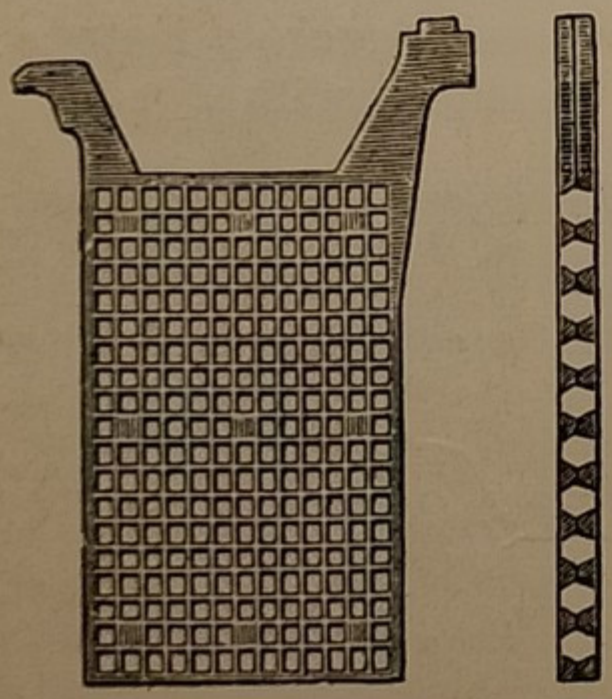


Fig. 379.

La capacità dell'accumulatore varia alquanto con l'intensità della corrente di scarica, e diminuisce con l'aumentare di tale intensità.

Problema. — *Un accumulatore fornisce scaricandosi: 48 amp. per 40 minuti; 56 amp. per 2,5 ore; 25 amp. per 5 ore. Qual'è la sua capacità?*

Si ha: $40^{m} = \frac{40}{60}$ di ora $= 0{,}67^{h}$.

$$\text{Capacità} = (48\ A \times 0{,}67^{h}) + (56\ A \times 2{,}5^{h}) + (25\ A \times 5^{h}) = \mathbf{297\ amp\text{-}ore.}$$

267. **Carica e scarica dell'accumulatore.** — Durante la carica la f.e.m. cresce da un minimo (di 1,8 *V*) fino a circa 2,7 *V* per ogni elemento; la carica è finita quando l'idrogeno e l'ossigeno non reagiscono più sulle lastre, e si svolgono liberamente; il liquido si rende effervescente e si dice

che l'*accumulatore bolle*. Per effetto della carica, come abbiamo già detto, le lastre positive acquistano un colore rosso-bruno, le negative un colore scuro d'ardesia.

Abbiamo visto (§ 265) che durante la carica l'elettrolito si concentra in acido solforico, cioè *aumenta di densità*. Si può quindi riconoscere se l'accumulatore è carico, esaminando la densità del suo liquido per mezzo di un *densimetro* (Vol. 1° - § 160).

La scarica si può ottenere o subito dopo o quando si vuole, dopo qualche giorno; o tutta di seguito, o ad intervalli; la f.e.m. dapprima diminuisce rapidamente fino a 1,9 *V* per ogni elemento, che si assume come *valore normale dell'accumulatore*; si mantiene per quasi tutta la scarica attorno a questo valore; poi diminuirebbe rapidamente fino a zero. Ma non si deve scaricare completamente l'accumulatore, perchè la superficie delle lastre si ricoprirebbe di uno strato di solfato di piombo compatto ed aderente, che annullerebbe la capacità dell'accumulatore; esso non sarebbe più suscettibile di accumulare elettricità. Si dice allora che l'accumulatore **si solfatizza**; e in tal caso è rovinato, non potendo le lastre ritornare alle condizioni primitive. Quindi bisogna interrompere la scarica allorchè la f.e.m. è scesa a 1,8 *V*, e si deve ricaricare al più presto: *l'accumulatore carico si conserva a lungo, mentre scarico si rovina in poco tempo*. Anche col densimetro si può riconoscere se l'accumulatore è scarico.

Gli accumulatori a piombo sono di limitata durata; inoltre non restituiscono che i due terzi della corrente di carica; perciò il loro uso è limitato. Sono praticamente impiegati per l'illuminazione delle vetture ferroviarie, per l'avviamento delle automobili, ecc. Per il loro peso rilevante non si prestano per l'automobilismo (vedasi Problema del § 349).

Edison provò, qualche anno fa, un accumulatore più leggero a lastre di acciaio e nichel in liquido alcalino; ma non ebbe buona riuscita.

Problema. — *La capacità di un accumulatore è di 800 amp-ora, e la scarica dura* $3^h\ 30^m$. *Qual'è l'intensità della corrente?*

Soluzione. — L'intensità di scarica si ottiene dividendo la capacità per il tempo della scarica:

$$I = \frac{800}{3{,}5} \text{ amp.} = \mathbf{229\ amp.}\ \text{circa.}$$

Problemi da risolvere.

1. Calcolare qual'è il peso di piombo che si deposita sulle lastre negative di un accumulatore, per ogni amp-ora.

2. La capacità di un accumulatore è rispettivamente di 135-150-180 amp-ora, se la durata della scarica è rispettivamente di 3-5-10 ore. Calcolare le intensità corrispondenti della corrente di scarica.

Resistenza dei conduttori.

268. **Resistenza elettrica.** — Dicemmo al § 162 che i metalli sono buoni conduttori; ma nessuno lo è perfettamente. Cioè ogni conduttore offre sempre, chi più chi meno, un certo ostacolo al propagarsi degli elettroni. Quest'ostacolo si chiama la **resistenza elettrica** del conduttore.

Se il conduttore, come avviene comunemente, ha la forma di un filo di sezione uniforme, si intuisce facilmente che la sua resistenza:

1. è direttamente proporzionale alla lunghezza del filo;
2. è inversamente proporzionale alla sua sezione;
3. varia con la natura di esso.

Se R è la resistenza del conduttore, l la sua lunghezza, s la sezione e k un coefficiente di proporzionalità, le tre leggi sono espresse dalla formula:

$$1) \qquad R = k \frac{l}{s} .$$

L'unita pratica di resistenza si chiama **Ohm** (*Oh*), e sarà definita al § 272; k dipende dalla natura del conduttore e si chiama la sua **resistenza specifica o resistività.**

Se nella 1) si fa: $l=1$ ed $s=1$, si ha: $R=k$; cioè: *la resistenza specifica è la resistenza che offre un conduttore lungo 1 cm. e della sezione di 1 cm².* Oppure, con altra definizione equivalente: *la resistenza specifica di una sostanza è la resistenza che offre un cubo di tale sostanza, avente 1 cm. di lato, allorchè la corrente passa da una faccia a quella opposta.*

Si chiama **conducibilità** l'inversa della resistenza:

$$2) \qquad C = \frac{1}{R} .$$

Si chiama **resistenza unitaria,** e s'indica con ϱ, la resistenza di un filo avente la lunghezza di un metro e la sezione di 1 mm²; evidentemente sarà:

$$3) \qquad \varrho = 10\,000\, k.$$

La **Tabella** seguente porta i valori di k e di ϱ per le sostanze più usuali:

SOSTANZA	k a 0° C.	ϱ a 0° C.	a
Argento	0,000 001 5	0,015	0,003 7
Rame elettrolitico	0,000 001 6	0,0159	0,004 1
Alluminio	0,000 002 9	0,029	0,003 9
Tungsteno	0,000 007	0,07	0,005
Ferro	0,000 011	0,11	0,006
Platino	0,000 013 5	0,135	0,003 7
Argentana (56 Cu + 26 Ni + 18 Zn)	0,000 030	0,30	0,000 36
Manganina (84 Cu + 12 Mn + 14 Ni)	0,000 047	0,47	0,000 02
Costantano (60 Cu + 40 Ni)	0,000 050	0,50	0,000 03
Mercurio	0,000 094	0,941	0,000 9
Nicromo (lega di nichel e cromo)	0,000 1	1	0,000 4
Carbone di storta	0,006 0	60	−0,000 3

Da essa si vede che la sostanza avente la minima resistenza e quindi la massima conducibilità, è l'argento; ma ne differisce di poco il rame (purchè puro, *elettrolitico*, § 254). Per tale ragione tutte le condutture per la corrente elettrica si fanno di rame elettrolitico. Le leghe hanno una resistenza notevolmente superiore a quella dei metalli che le compongono.

In un circuito formato da una pila e da un conduttore inserito tra i poli di essa, si considerano separatamente: la resistenza di questo conduttore, che si chiama la **resistenza del circuito esterno** e quella dei liquidi ed altre sostanze contenute nella pila tra un elettrodo e l'altro, che si chiama la **resistenza interna.**

Esempio. — *Calcolare la resistenza a 0°C. di 50 m. di filo di rame, del diametro di mm. 0,2.*

Nella 1) faremo:

$$k = 0{,}0000016 \qquad l = \text{cm. } 5000 \qquad s = \text{cm}^2\,[(0{,}01)^2 \times 3{,}14] = \text{cm}^2\ 0{,}000314.$$

e sarà: $$R = ohm\ 0{,}000\,0016\ \frac{5000}{0{,}000\,314} = \textbf{ohm 25,5.}$$

269. **Variazione della resistenza con la temperatura.** — La resistenza di un conduttore varia anche con la temperatura, secondo la legge:

$$4) \qquad R_t = R_0(1 + \alpha t)\,,$$

in cui R_0 è la resistenza del conduttore alla temperatura di 0°; R_t è la resistenza del medesimo conduttore a $t°$; α è un coefficiente, variabile da sostanza a sostanza, che si chiama il **coefficiente di temperatura.** α è positivo per i metalli, il mercurio, ecc.; cioè per questi corpi la resistenza *aumenta col riscaldamento*. È invece negativo per il carbone e per gli elettroliti; cioè per questi altri corpi la resistenza *diminuisce col riscaldamento*. Alla temperatura di $-273°\,C$, cioè allo zero assoluto (Vol. 1° - § 269), la resistenza di un conduttore metallico dovrebbe annullarsi.

Con l'esperienza si è verificato che la resistenza si annulla anche qualche grado al disopra dello zero assoluto. Così Kamerlingh Onnes (1) nel Laboratorio frigorifero di Leyda, trovò che la resistenza del mercurio puro, racchiuso in un tubo capillare di vetro, si annulla praticamente a 4°,2 assoluti; lo stesso fenomeno fu riscontrato nello stagno a 3°,8, nel piombo a 6°,9, ecc. In tali condizioni i corpi si dicono **superconduttori.**

Nella Tabella del § 268 sono riportati nell'ultima colonna i valori di α. Vi sono leghe come la manganina, per le quali il valor di α è così piccolo, che si può trascurare la variazione di resistenza con la temperatura, entro i limiti della variazione giornaliera di questa.

Problema. — *Quanti metri di filo di ferro, di mm. 2 di diametro, occorrono per formare la resistenza di 25Oh a 60°C?*

Soluzione. — Dalla 4) si ricava:

$$R_0 = \frac{Rt}{1 + \alpha t}; \qquad \text{quindi } 25\,Oh \text{ di ferro a } 60° \text{ formano a } 0°:$$

$$R_0 = \frac{25}{1 + (0{,}006 \times 60)}\,Oh = 18{,}38\,Oh.$$

---

(1) Kamerlingh Onnes, fisico dell'Università di Leyda; n. a Groningen (Paesi Bassi) nel 1853, m. a Leyda nel 1926.

Per la 1), per ottenere tale resistenza con un filo di ferro del diam. di mm. 2, cioè della sezione di cm² 0,0314, occorre la lunghezza:

$$l = \frac{R\,s}{k} = \text{cm.}\,\frac{18{,}38 \times 0{,}0314}{0{,}000\,011} = \text{cm.}\,52\,466 = \textbf{m. 524,66.}$$

270. **Bolometro - Pirometro elettrico.** — Sulla variazione di resistenza con la temperatura è basato uno strumento, chiamato **bolometro**, che si adopera quale termometro sensibilissimo. Risolvendo infatti la 4) rispetto a t si ricava:

$$5) \qquad t = \frac{R_t - R_0}{R_0\,\alpha}\ ;$$

e quindi dalla misura sperimentale delle resistenze di un sottile filo di platino a 0° ed alla temperatura incognita t da misurare, essendo α noto, si può ricavare il valore di tale temperatura. Facendo uso di un *galvanometro* (§ 304) sensibilissimo, si possono valutare differenze di temperatura dell'ordine di un decimillesimo di grado.

Con minore sensibilità si può costruire uno strumento capace di misurare temperature assai elevate, per le quali non servono i termometri usuali; si chiama il **pirometro elettrico.**

Problemi da risolvere.

1. Quanti m. di filo di alluminio del diam. di mm. 1,5, occorrono per ottenere a 0° la resistenza di 25 *Ohm*?

2. Che resistenza ha a 20° un filo di rame lungo m. 100 e del diametro di mm. 3?

3. A quale temperatura occorre riscaldare un filo di carbone del diametro di mm. 0,2, lungo cm. 12, perchè la sua resistenza diventi 175 *Ohm*?

4. Un filo di platino, la cui resistenza a 0° è di 3 *Ohm*, assume la resistenza di 5,4 *Ohm* immerso in un liquido isolante. Qual'è la temperatura di questo liquido?

5. Qual'è la conducibilità di un filo di platino del diametro di mm. 0,3, lungo m. 30 a 50°C?

6. Un rocchetto ha il diametro interno di cm. 6; contiene 12 strati di filo di rame elettrolitico di diametro (a nudo) di mm. 0,7, ricoperto di cotone per lo spessore di mm. 0,1; la lunghezza del rocchetto è di cm. 12. Calcolarne la resistenza a 25°C.

Legge di Ohm.

271. **Legge di Ohm.** — Dobbiamo ora studiare che relazione esiste tra l'intensità della corrente, la forza elettromotrice e la resistenza del circuito.

Supponiamo di avere un circuito semplice, formato da una pila P ed un conduttore AB di resistenza r, (Fig. 380). Nel tratto AB passerà una corrente, la cui intensità I è eguale in tutti i punti del circuito (§ 247). Non così sarà del potenziale: esso avrà un valore V_A positivo nel punto A e un altro V_B negativo nel punto B; diminuirà perciò gradatamente da $+V_A$ a $-V_B$, passando per il valore zero.

Ora, l'esperienza dimostra che tra due punti A e B del circuito, *la differenza di potenziale è proporzionale direttamente all'intensità della corrente ed alla resistenza del conduttore compreso fra tali punti.* Cioè:

$$1) \qquad V_A - V_B = c\,I\,r\ ;$$

in cui c è un coefficiente di proporzionalità. Si possono scegliere le unità in modo che risulti $c = 1$, ed allora la 1) si semplifica nell'altra:

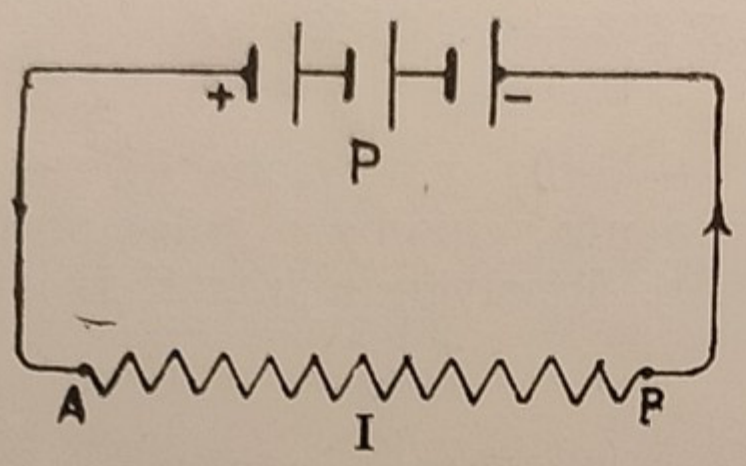


Fig. 380.

$$2) \qquad V_A - V_B = I\,r.$$

La differenza di potenziale $V_A - V_B$ dipende dal valore della forza elettromotrice della pila P, ma è a questa minore. Chiamando con E tale forza elettromotrice, e con ϱ la resistenza interna della pila (§ 268), Ohm trovò che (trascurando la resistenza dei reofori che uniscono i poli della pila ai capi A e B del circuito esterno) è:

$$3) \qquad E = I\,(r + \varrho).$$

La 3) si può scrivere:

$$4) \qquad E = I\,r + I\,\varrho, \qquad \text{cioè per la 2):}$$

$$5) \qquad E = (V_A - V_B) + I\,\varrho; \qquad \text{e, quindi:}$$

$$E > V_A - V_B \qquad \text{come appunto s'era detto.}$$

Dividendo membro a membro la 4) per la 2) si ha:

$$6) \qquad \frac{E}{V_A - V_B} = 1 + \frac{\varrho}{r}.$$

Se si apre il circuito, in modo che sia $r = \infty$, la 6) diventa:

$$\frac{E}{V_A - V_B} = 1; \qquad \text{cioè:} \qquad E = V_A - V_B;$$

la quale dice che: *la forza elettromotrice della pila è uguale alla differenza di potenziale tra i suoi poli a circuito aperto.*

Chiamando con R la resistenza totale del circuito, cioè ponendo $R = r + \varrho$, la 3) si può scrivere:

$$7) \qquad I = \frac{E}{R}$$

che è la **legge di Ohm** [1]. Essa si può enunciare:

l'intensità della corrente è direttamente proporzionale alla forza elettromotrice ed inversamente alla resistenza totale del circuito.

272. **Unità di resistenza.** — La 7) permette di ricavare l'**unità di resistenza;** sarà: $R = 1$ per $I = 1$ ed $E = 1$; cioè:

l'unità (pratica) di resistenza è quella di un conduttore, in cui con la f. e. m. di 1 volt si ottiene una corrente dell'intensità di 1 ampère.

Tale unità, come si è accennato al § 268, si chiama **Ohm.** Da misure eseguite con accuratezza, è stato determinato che:

l'Ohm è la resistenza alla temperatura di 0°C, di una colonna di mercurio di sezione costante, della lunghezza di cm.106,3 e della massa di g.14,4521.

---

(1) Ohm George, fisico dell'Univ. di Monaco; n. a Erlangen nel 1787, m. a Monaco nel 1854.

La sezione di tale colonna risulta assai vicina ad 1 mm²; tale resistenza corrisponde all'incirca a quella offerta da m. 60 di filo di rame della sezione di 1 mm², ed equivale all'incirca alla resistenza di m. 100 di filo telegrafico.

Problema. — *Ai poli di una pila, la cui f.e.m. è di 8 volt, e la resistenza interna è di 3,37 Oh, sono attaccati i capi di un filo di argentana del diametro di mm. 1,2 e della lunghezza di m. 25. Calcolare l'intensità della corrente.*

Soluzione. — La resistenza di tal filo è (a 0°, § 268):

$$r = Oh\ 0{,}000\,03\ \frac{2500}{(0{,}06)^2 \times 3{,}14} = 6{,}63\ Oh;$$

quindi per la 7) sarà:

$$I = \frac{8}{3{,}37 + 6{,}63}\ amp. = \mathbf{0{,}8\ amp.}$$

273. **Reostato.** — Dalla legge di Ohm risulta che variando in un circuito la resistenza, ne varierà anche l'intensità della corrente. La variazione della resistenza si potrà fare inserendo nel circuito conduttori di lunghezza diversa; ciò si ottiene appunto coi **reostati.**

La Fig. 381 mostra in prospettiva un reostato di forma comune; la Fig. 382 ne dà lo schema. Parecchie coppie di spirali metalliche (usualmente di filo di argentana) sono tese su una cornice isolante, in modo da formare una catena continua; i capi 1 e 6 di essa e i punti di congiunzione delle due coppie successive di spirali, comunicano con bottoni 1–2–3..6 di metallo, fissati su una lastra di marmo secondo un arco di circonferenza; su di essi poggia e scorre una sbarretta di metallo C, girevole attorno al pernio O; questo pernio comunica con un serrafilo B ed il bottone 1 con un altro serrafilo A; con questi serrafili il reostato s'inserisce nel circuito di cui si vuol variare la resistenza.

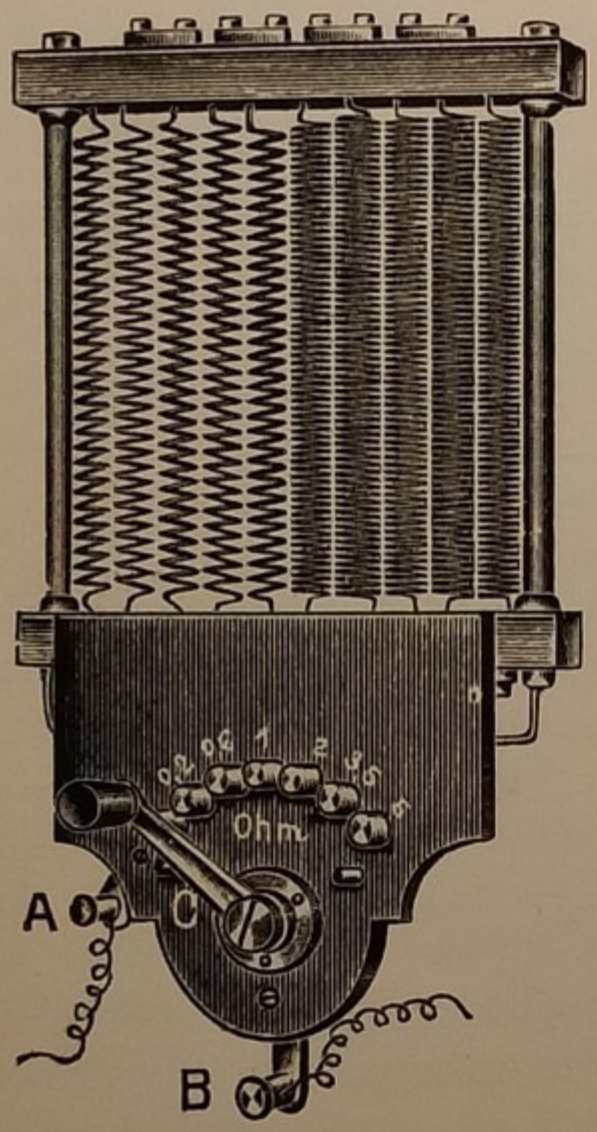


Fig. 381.

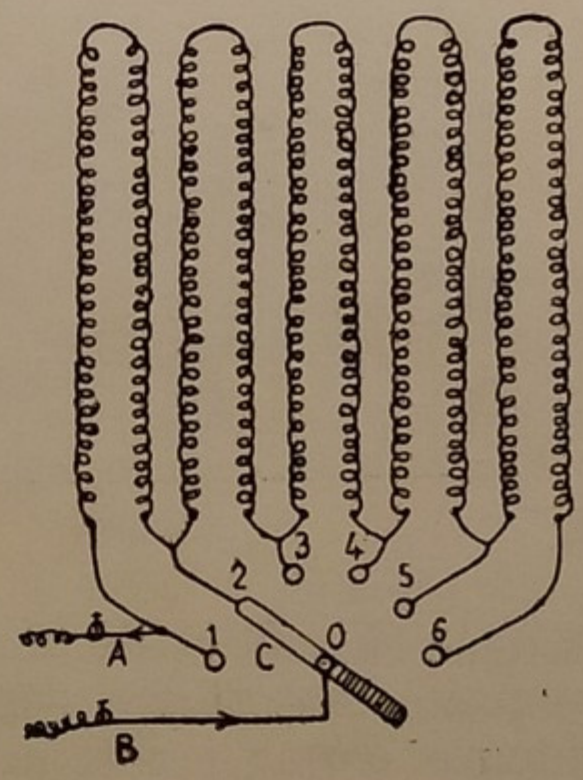


Fig. 382.

Se la sbarretta C è sul bottone 1, la corrente passa da B ad A direttamente, e quindi nel reostato non v'è inserita alcuna resistenza. Se la sbarretta è sul bottone 2 (come in Fig. 382), la corrente per passare da B ad A deve attraversare la prima coppia di spirali e incontra la resistenza da essa offerta; sul bottone 3 è inserita la resistenza di due coppie di spirali; e così via, sul bottone 6 è inserita la resistenza di tutte le spirali.

La Fig. 383 rappresenta un **reostato a corsoio,** frequentemente adoperato. Un filo nudo di argentana, di conveniente diametro, è avvolto ad elica su un cilindro isolante A; i suoi capi comunicano coi serrafili $S - S_1$. Sul filo

poggia una molla M di metallo, che può scorrere per mezzo di un corsoio C, guidato da un'asta di ottone $O - O$, con cui comunica la molla M; l'asta comunica col serrafilo S_2. S'inserisce il reostato nel circuito, per mezzo dei serrafili $S - S_2$; la corrente così incontra la resistenza del filo di argentana compreso tra l'estremo comunicante con S e la molla M, che può variare da 0 alla resistenza totale di tutto il filo.

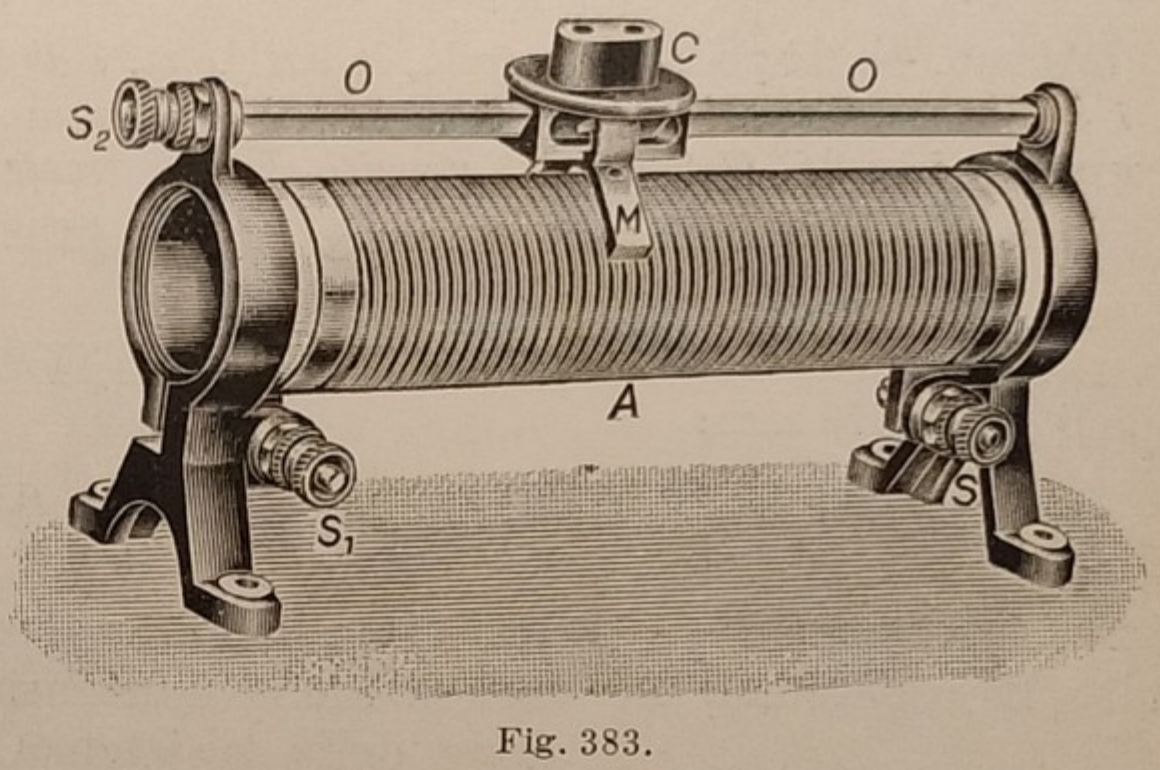


Fig. 383.

274. **Cassette di resistenza.** — I reostati si adoperano per regolare l'intensità della corrente, ma non sono adatti per le misure, per le quali occorrono resistenze esattamente graduate. In questo caso si ricorre alle **cassette di resistenza** (Fig. 384), nelle quali le resistenze sono costituite da rocchetti

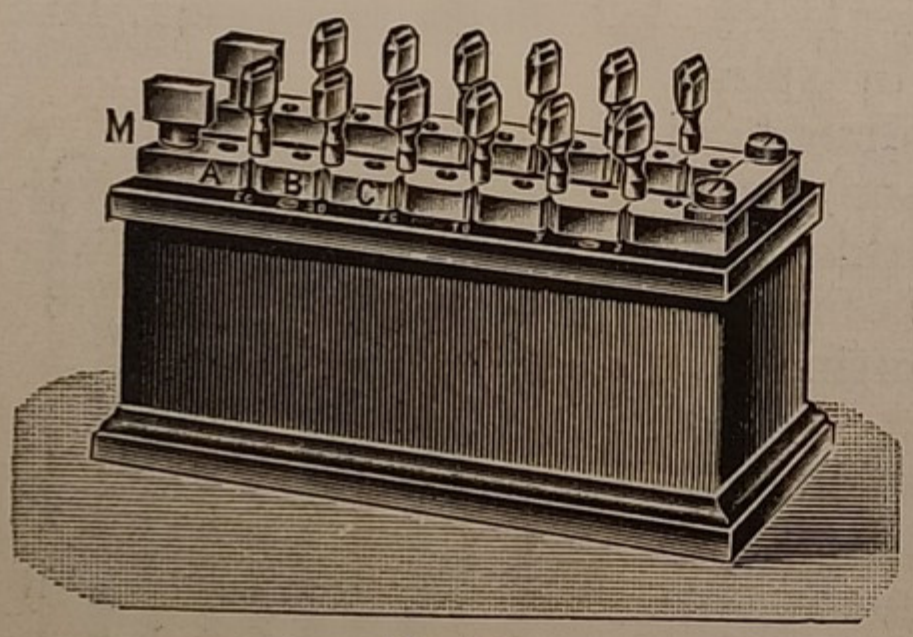


Fig. 384.

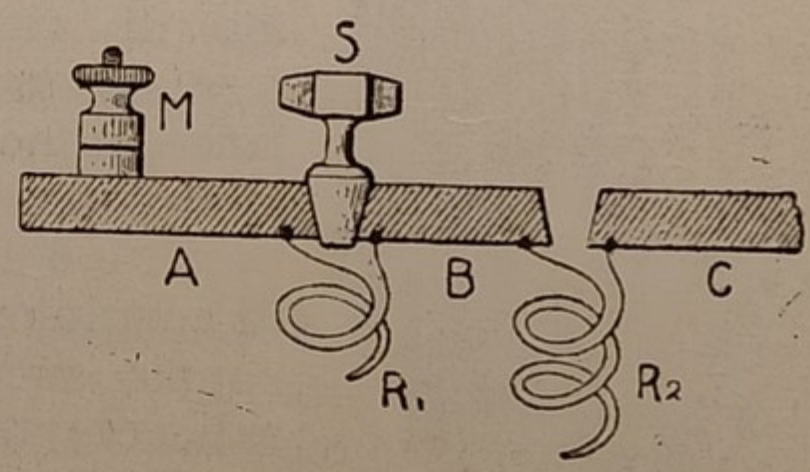


Fig. 385.

$R_1 R_2 \ldots$ (Fig. 385) di filo di manganina (perchè siano di resistenza praticamente invariabile con la temperatura), di valore opportunamente frazionato (come i pesi di una pesiera), perchè con la loro combinazione si possa formare qualunque numero da zero ad un massimo dato.

L'inserzione di ciascuna resistenza R_1 si fa togliendo una *spina* di metallo S, infilata in apposito foro, accanto a cui è scritto il valore della resistenza inserita. Quando la spina è nel foro, mette in comunicazione diretta due blocchetti A e B di metallo, a cui sono collegati i capi di R_1 e questa rimane così esclusa.

275. **Principi di Kirchhoff.** — La legge di Ohm vale per il calcolo dei circuiti semplici, formati cioè da un solo ramo. Quando invece il circuito si divide in due o più **rami derivati**, si applicano i due **principi di Kirchhoff** (1):

1. Se più conduttori s'incontrano in uno stesso punto (*che si chiama* nodo), *la somma algebrica delle intensità delle correnti che vi concorrono è nulla.*

(1) Vedasi nota al § 114.

La somma algebrica sottintende che le intensità delle correnti abbiano un segno. Si assumono come positive le intensità delle correnti che vanno verso il nodo, e come negative quelle che se ne allontanano. Nel caso della Fig. 386 il 1° principio di Kirchhoff dice che:

$$i_1 - i_2 + i_3 + i_4 - i_5 = 0; \qquad \text{cioè:} \qquad i_1 + i_3 + i_4 = i_2 + i_5.$$

Sotto l'ultima forma il principio è evidente, perchè esprime che nel nodo non può accumularsi nè sottrarsi elettricità: tutta quella che vi arriva deve poi dipartirsene. Del resto il principio è già espresso nella 3ª legge dell'elettrolisi, che vedemmo al § 248.

Esempio. — *In un circuito come è indicato nella Fig. 387, calcolare il senso e il valore della corrente nel ramo OD.*

Dev'essere: $i_1 - i_2 + i_3 + x = 0$; e sostituendo i valori dati: $3 - 6 + 2 + x = 0$; cioè: $\boldsymbol{x = +1}$ **amp.**

La corrente nel ramo OD sarà diretta verso il nodo O ed avrà l'intensità di 1 *amp*.

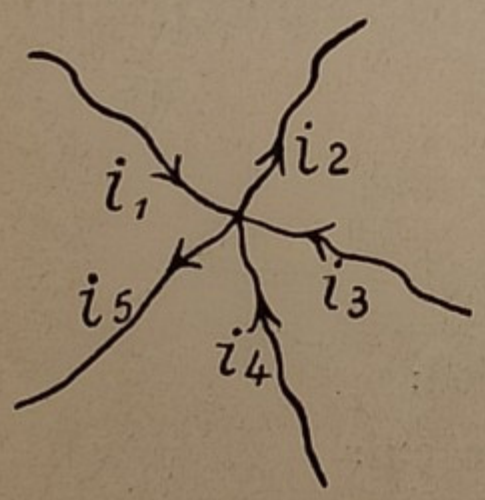


Fig. 386.

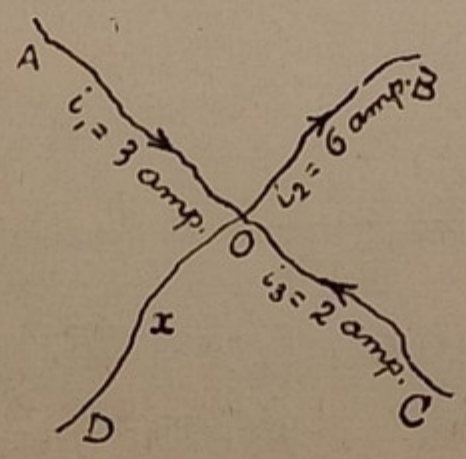


Fig. 387.

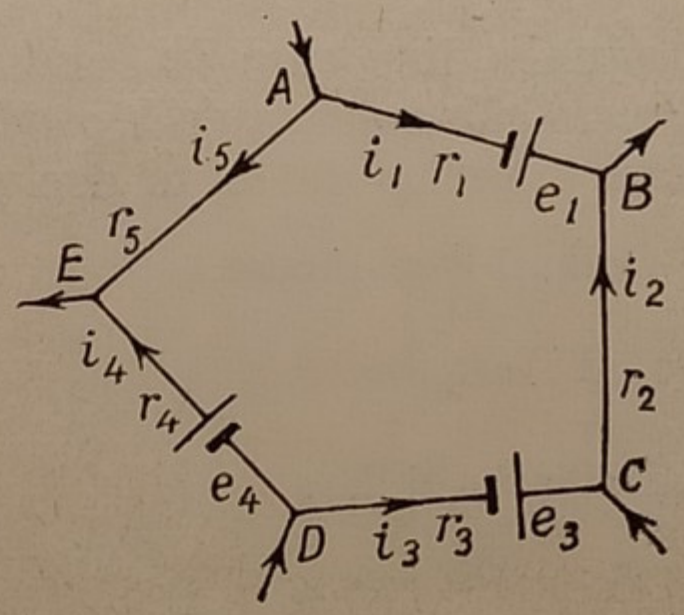


Fig. 388.

2. *In un circuito poligonale chiuso di conduttori* (*che si chiama una* maglia) *la somma algebrica dei prodotti della intensità delle correnti per la resistenza di ciascun lato, è eguale alla somma algebrica delle forze elettromotrici.*

Per determinare il segno dei termini delle due somme, assumeremo come positivi i valori delle intensità delle correnti che circolano nel senso delle lancette dell'orologio, negativi quelli in senso contrario; e per le f.e.m. (ricordando che si conviene che la corrente vada dal polo + al polo —) assumeremo come positive quelle che producono un aumento del potenziale nel senso delle lancette dell'orologio, negative le altre. Se in qualche ramo non vi è f.e.m. (cioè non vi è inserita alcuna pila), il suo valore corrispondente è zero; se in nessun ramo vi è f.e.m., la somma algebrica dei prodotti delle intensità per le resistenze è zero.

Nel caso della Fig. 388, se con i_n, r_n, e_n s'indicano l'intensità, la resistenza, la f.e.m. di ciascun ramo, sono: i_1 ed i_4 positive, i_2, i_3 ed i_5 negative, e_1 ed e_4 positive, e_3 negativa, e_2 ed e_5 nulle. Per il 2° principio di Kirchhoff sarà:

$$i_1 r_1 - i_2 r_2 - i_3 r_3 + i_4 r_4 - i_5 r_5 = e_1 - e_3 + e_4.$$

276. **Circuiti derivati.** — Supponiamo che una corrente d'intensità I si suddivida in A (Fig. 389) in due rami di resistenza r_1 e r_2; siano i_1 ed i_2 le intensità in questi due rami derivati ed R la resistenza complessiva equivalente ai due rami insieme; (R *non è* dunque eguale ad $r_1 + r_2$; anzi *è minore* di ciascuna di queste).

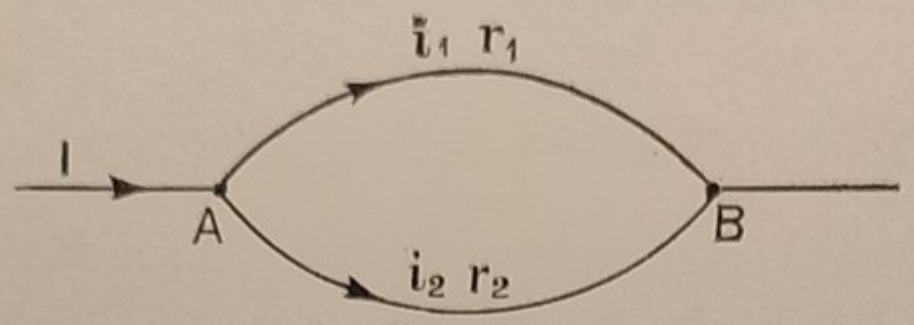


Fig. 389.

Per il 1° principio di Kirchhoff nel nodo A sarà:

8) $$I = i_1 + i_2 .$$

Per la legge di Ohm, se Δ è la differenza di potenziale tra A e B sarà:

9) $$i_1 = \frac{\Delta}{r_1}; \qquad i_2 = \frac{\Delta}{r_2}; \qquad I = \frac{\Delta}{R}$$

e sostituendo nella 8):

10) $$\frac{\Delta}{R} = \frac{\Delta}{r_1} + \frac{\Delta}{r_2}; \qquad \text{cioè:} \qquad \frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}$$

la quale dice che: *la conducibilità* (§ 268) *complessiva dei rami derivati è uguale alla somma delle conducibilità dei singoli rami;* il che vale qualunque sia il numero dei rami derivati.

Dalla 10) si ricava:

11) $$R = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} .$$

Dalle 9) si ha: $$\Delta = i_1 r_1 = i_2 r_2 = I R, \qquad \text{cioè:}$$

$$i_1 r_1 = I R, \qquad i_2 r_2 = I R, \qquad \text{da cui:}$$

12) $$i_1 = I \frac{R}{r_1} = I \frac{r_2}{r_1 + r_2}; \qquad i_2 = I \frac{R}{r_2} = I \frac{r_1}{r_1 + r_2} .$$

Esempio. — *Le resistenze dei due rami derivati sono rispettivamente:* $r_1 = 20$ Oh *ed* $r_2 = 12$ Oh; *l'intensità nel ramo principale è:* $I = 16$ amp. Sarà:

$R = \frac{20 \times 12}{20 + 12} Oh = 7{,}5\ Oh$, la resistenza complessiva dei due rami; e:

$$i_1 = 16 \frac{12}{20 + 12} amp = 6\ amp, \qquad i_2 = 16 \frac{20}{30 + 12} amp = 10\ amp,$$

le intensità nei due rami derivati.

277. **Ponte di Wheatstone.** — Sui principi di Kirchhoff si basa il **ponte di Wheatstone,** che si adopera *per la misura della resistenza elettrica dei conduttori.* Siano r_1 - r_2 - r_4 tre resistenze note, costituite da tre cassette di resistenza (§ 274) ed x una quarta resistenza incognita, che è quella da misurare. Si colleghino in modo da formare un sistema, come è indicato schematicamente nella Fig. 390; nella diagonale BD si inserisce un *galvanometro* (§ 304) sensibilissimo; nell'altra diagonale AC, una pila P di qualche elemento; T indica un interruttore (*un tasto*) che permette di lanciare la corrente della pila ad un istante voluto. Si inseriscano nelle cassette r_1 ed r_2

due resistenze a piacere; indi si varia *per tentativi* la resistenza r_4 finchè chiudendo per un istante il tasto T, il galvanometro G non segna corrente. I tentativi sono agevolati dal fatto che mettendo per r_4 valori crescenti, la deviazione di G può aumentare o diminuire; se la deviazione aumenta, bisognerà anzichè valori crescenti, inserire valori decrescenti di r_4; se la deviazione diminuisce, si continuerà ad aumentare r_4 fino a raggiungere lo scopo avanti detto (che in G la corrente sia zero); se si è oltrepassato il valore giusto di r_4 la deviazione di G s'inverte di senso.

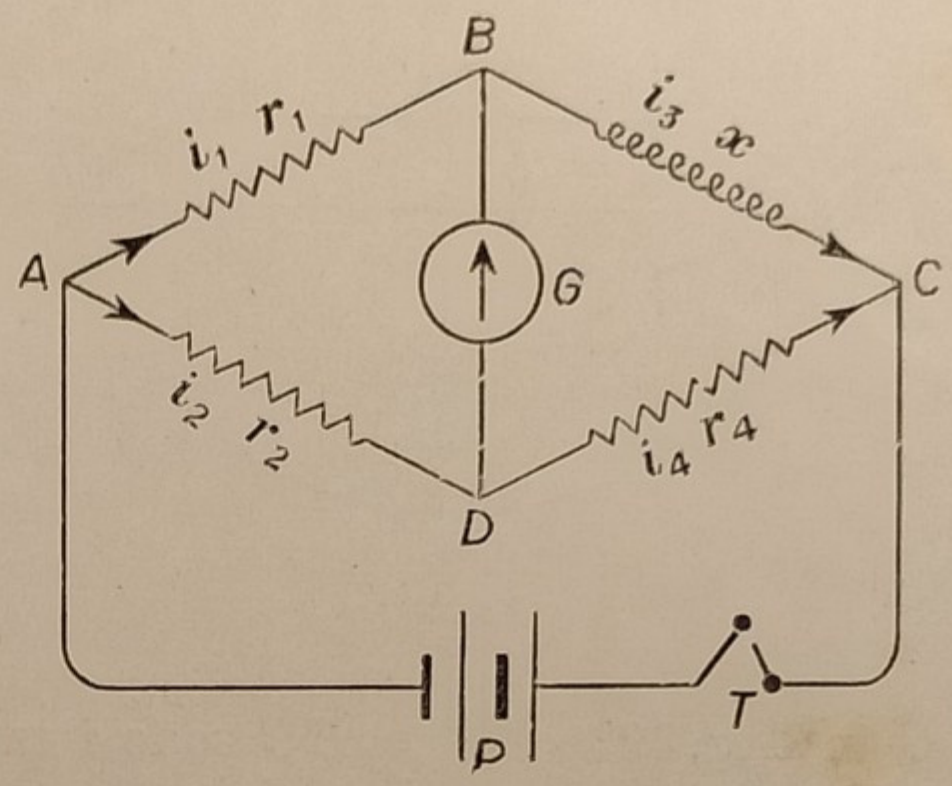


Fig. 390.

Raggiunta la condizione precedente, siano ordinatamente $i_1 - i_2 - i_3 - i_4$ le intensità delle correnti nei quattro rami AB - AD - BC - DC; nel ramo BD l'intensità è zero; allora, applicando il 2° principio di Kirchhoff alla maglia ABD, tenendo conto del segno delle i come indicato in Fig. 390, e che nei rami della maglia non vi sono pile, cioè non vi sono f.e.m., si ha:

13) $$i_1 r_1 - i_2 r_2 = 0 \quad ; \quad \text{cioè:} \quad i_1 r_1 = i_2 r_2$$

Parimenti, nella maglia BCD è: $i_3 x = i_4 r_4$.

Applicando il 1° principio di Kirchhoff nel nodo B, ricordando ancora che l'intensità della corrente in BD è zero, si ha:

$i_1 - i_3 = 0$; cioè $i_1 = i_3$; e parimenti nel nodo D è:
$i_2 = i_4$. Sostituendo nelle 13), esse diventano:
$i_1 r_1 = i_2 r_2$
$i_1 x = i_2 r_4$. Dividendo membro a membro:

14) $$r_1 : x = r_2 : r_4 , \qquad \text{da cui:} \qquad x = \frac{r_1}{r_2} r_4 .$$

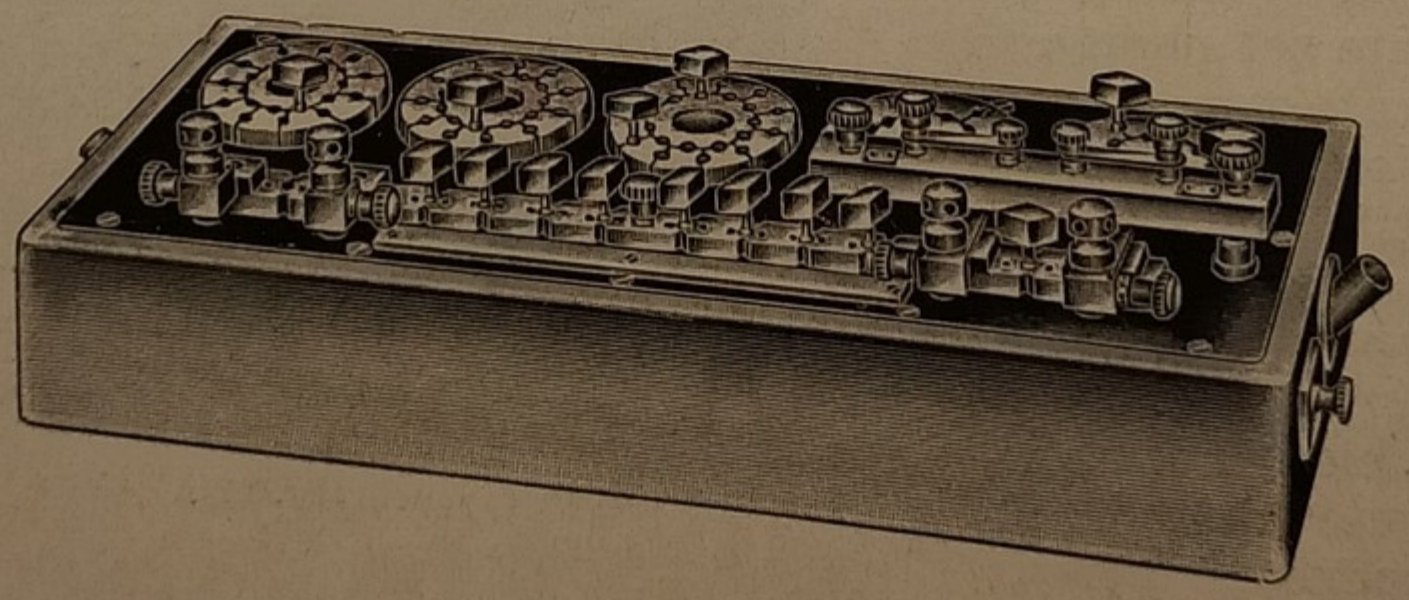


Fig. 391.

Le resistenze r_1 ed r_2 si stabiliscono a priori nel rapporto voluto; es.: 1 : 1, 1 : 10, 1 : 100.... secondo il valore di x; i rami che li contengono si

chiamano i *rami di proporzione*; il ramo che contiene r_4 si chiama il *ramo di paragone*. In pratica le resistenze r_1 - r_2 - r_4 fanno parte di una cassetta di resistenza unica (Fig. 391), che contiene morsetti doppi per la inserzione degli altri elementi (pila, galvanometro, resistenza incognita) ed il tasto occorrente.

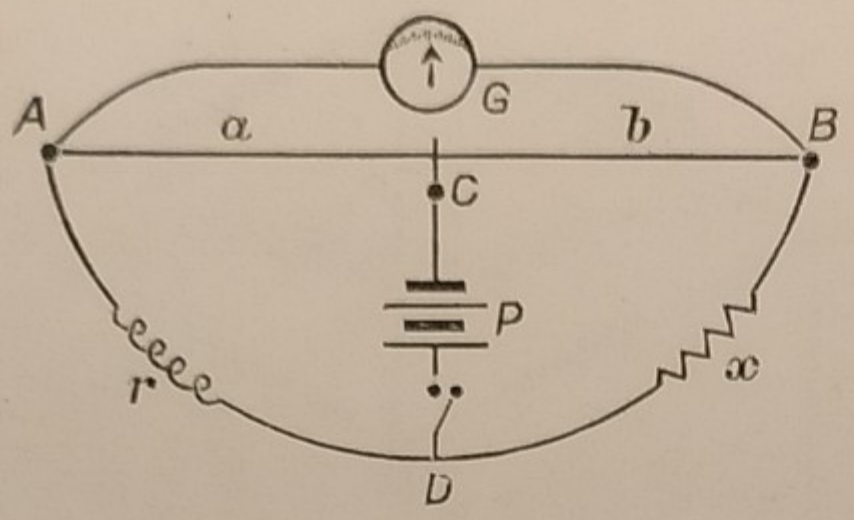


Fig. 392.

Se la resistenza da misurare è piccola, si può semplificare il ponte adoperando un *reocordo*. È questo un filo AB di metallo inalterabile (solitamente platino) teso su un regolo graduato; su di esso scorre un contatto mobile C (*corsoio*); lo schema del sistema è rappresentato in Fig. 392; AC e BC sono i rami di proporzione, le cui resistenze sono formate dai tratti corrispondenti del filo del reocordo, ed il cui rapporto è uguale alle lunghezze a e b di essi, leggibili sulla graduazione del reocordo; il valore di tale rapporto può variare a piacere a secondo della posizione del corsoio C. Messa nella cassetta di resistenza per r un valore a piacere, si sposta il corsoio finchè il galvanometro G non dà deviazione; in tali condizioni per la 14) è:

$$x = \frac{b}{a} r.$$

278. **Ponte di Kohlrausch.** — Se la resistenza x è quella di un *elettrolito* (§ 241), non si può adoperare nel ponte la *corrente continua* di una pila; perchè l'elettrolito si polarizzerebbe (§ 258) e sarebbero introdotte così nel ponte nuove f.e.m. che altererebbero le condizioni di equilibrio determinate nel paragrafo precedente. In questo caso Kohlrausch pensò di sostituire alla pila un piccolo *rocchetto di Ruhmkorff* (§ 325) che dà *correnti alternate* (§ 331), cioè di senso rapidamente variabile, che non producono polarizzazione sensibile. Per la misura di queste non è però adatto il galvanometro; ad esso si sostituisce un *ricevitore telefonico* (§ 326), che emette un suono se percorso da corrente alternata, ed è sensibilissimo quanto un buon galvanometro. Per la misura perciò si regolano le resistenze del ponte *finchè nel telefono non si sente più alcun suono*. La Fig. 393 indica una forma pratica dell'apparecchio, con reocordo.

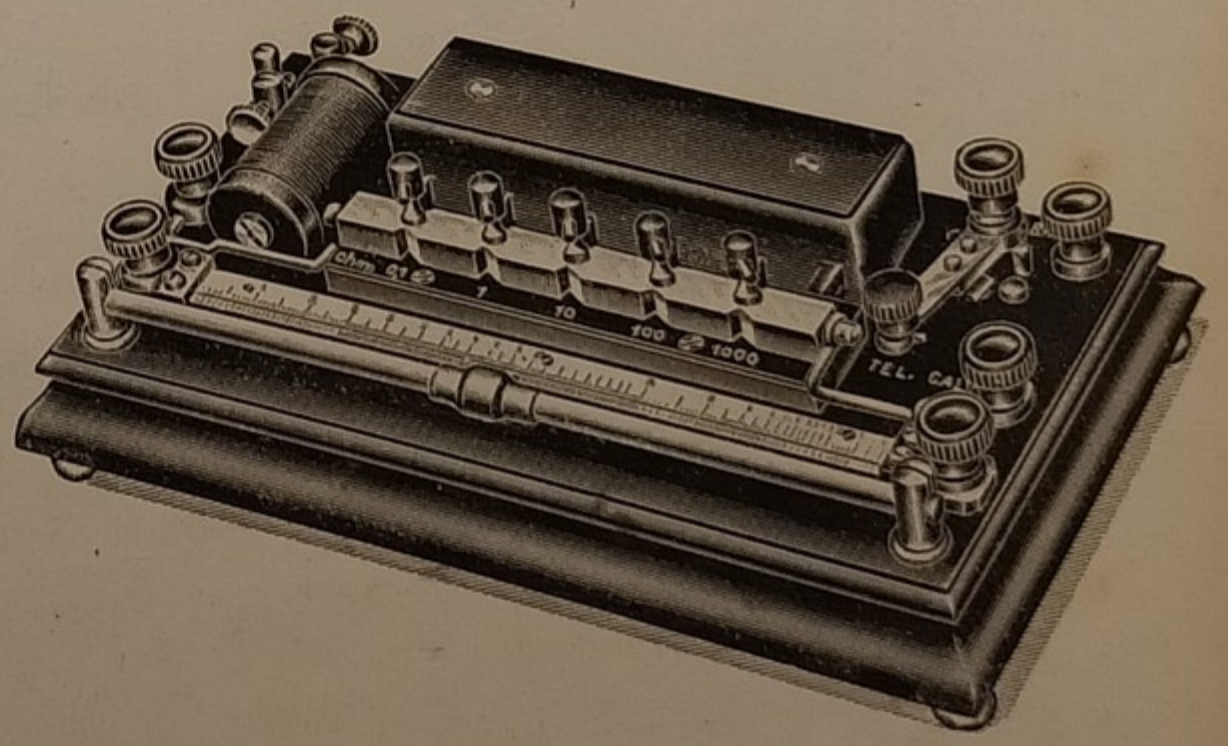


Fig. 393.

279. **Aggruppamento degli elementi di una pila.** — Quando una pila è formata con più elementi, questi possono riunirsi tra loro in uno dei seguenti modi principali:

1. **In serie o tensione**: Si unisce il polo — del 1° elemento col polo + del 2; il — del 2° col + del 3°; ecc. Restano liberi il polo + del 1° elemento ed il polo — dell'ultimo, che formano i poli di tutta la pila, fra i quali s'inserisce la resistenza esterna R, (Fig. 394).

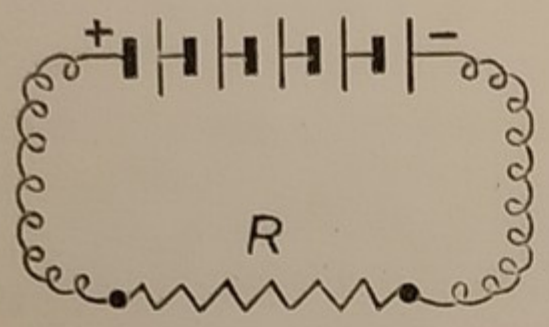


Fig. 394.

Con questa disposizione si sommano le f.e.m. dei singoli elementi (§ 239); ma si sommano anche le loro resistenze interne. Se si hanno perciò n elementi eguali, ed e ed r sono la f.e.m. e la resistenza interna di ciascuno di essi, saranno ne ed nr la f.e.m. e la resistenza interna di tutto l'insieme; quindi per la legge di Ohm l'intensità della corrente sarà:

15) $I_n = \dfrac{n\,e}{R + n\,r}$; mentre con un solo elemento sarebbe:

16) $I_1 = \dfrac{e}{R + r}$. La 15) si può scrivere:

17) $$I_n = \frac{e}{\frac{R}{n} + r} .$$

Se R è piccolo rispetto ad r, i denominatori della 16) e della 17) sono pressochè eguali, e quindi I_n è pressochè eguale ad I_1; cioè non si ha convenienza ad aumentare il numero degli elementi. Se invece è r trascurabile rispetto ad R, si ha sensibilmente:

18) $I_n = \dfrac{n\,e}{R}$; $I_1 = \dfrac{e}{R}$; e quindi: $I_n = n\,I_1$;

cioè l'intensità della corrente cresce proporzionalmente al numero degli elementi; che è lo scopo da raggiungere. Quindi:

l'aggruppamento in serie conviene allorchè la resistenza esterna è grande rispetto a quella interna di ciascun elemento.

2. **In quantità o parallelo**: Si uniscono tutti i poli + dei varî elementi tra di loro, e così pure tutti i poli —; si formano così i due poli di tutta la pila, fra cui s'inserisce la resistenza esterna R, (Fig. 395). Con questa disposizione la f.e.m. di tutto l'insieme è la stessa di quella di un solo elemento; mentre la resistenza interna si riduce ad $r : n$, se n è il numero degli elementi. L'intensità della corrente con n elementi sarà perciò:

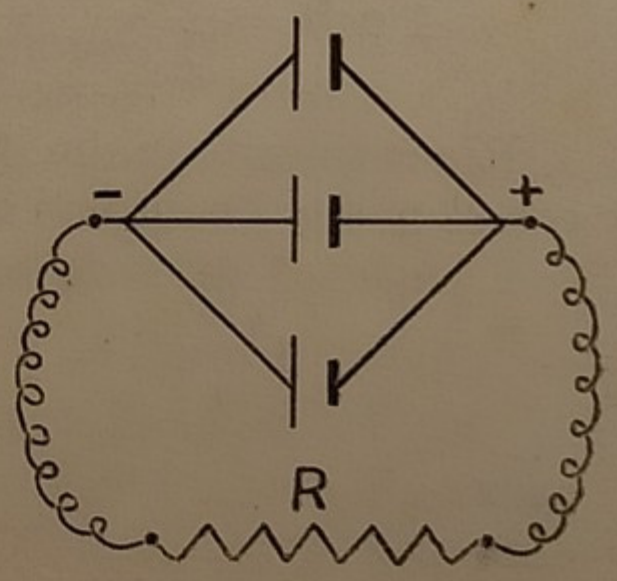


Fig. 395.

19) $$I_n = \frac{e}{R + \frac{r}{n}} .$$

Se r è piccolo rispetto ad R, questo valore di I_n è pressochè eguale ad I_1 della 16), cioè l'intensità della corrente è pressochè eguale con uno o con più elementi, e non vi è convenienza ad adoperare questo aggruppamento. Se invece R è trascurabile rispetto ad r, si ha sensibilmente:

$$20) \qquad I_n = \frac{e}{\frac{r}{n}} = \frac{n\,e}{r} = n\,I_1$$

e l'intensità cresce proporzionalmente al numero degli elementi, che è lo scopo prefissato. Quindi: *l'aggruppamento in quantità conviene allorchè la resistenza esterna è piccola rispetto a quella interna di ciascun elemento.*

Problemi da risolvere.

1. Un filo di ferro di m. 80 di lunghezza è percorso da una corrente di 8 *amp*, avendo ai suoi capi la tensione di 10 V. Determinarne il diametro.

2. La corrente di una pila attraversa un circuito della resistenza di 100000 *ohm*. Due punti A e B del circuito, fra cui vi è la resistenza di 1 *ohm*, sono collegati ai morsetti di un galvanometro, la cui resistenza è di 540 *ohm*. Calcolare la f.e.m. della pila, sapendo che l'intensità della corrente che passa nel galvanometro è di 2×10^{-8} *amp*.

3. Con elementi di pila di costanti $r = 0{,}25$ *ohm*, ed $e = 1{,}8\,V$, si vuole alimentare un apparecchio che funziona a 45 V, con 10 *amp*. Determinare il numero occorrente degli elementi aggruppati in serie, e la resistenza dell'apparecchio da alimentare.

Energia elettrica.

280. **Potenza della corrente.** — In diverse occasioni abbiamo notato che l'elettricità è una forma di energia; cioè può produrre un lavoro.

Per la valutazione di questo lavoro, ricordiamo la definizione di *volt* (§ 177), e cioè:

$$1\ volt = \frac{1\ joule}{1\ coulomb}; \qquad \text{ossia:} \qquad 1\ joule = 1\ volt \times 1\ coulomb.$$

Ricordiamo anche (§ 246) che *1 ampère* è l'intensità di corrente per la quale passa *1 coulomb* al secondo; quindi l'ultima eguaglianza si può scrivere:

1 *joule* $\times$ 1 *secondo* = 1 *volt* $\times$ 1 *coulomb* $\times$ 1 *secondo*; ossia (Vol. 1° - § 122):

1) $\quad 1\ watt = 1\ volt \times 1\ amp.$; e in generale:

2) $\quad w = ei$; in cui abbiamo indicato con w i *watt*, con e i *volt*, con i gli *ampère*. Ricordando che il watt è l'unità pratica di potenza, la 2) dice pertanto, che:

la potenza della corrente elettrica è uguale al prodotto della f.e.m. per l'intensità della corrente.

Esempio. — *Se una lampada elettrica funziona a 120 V e richiede 1,5 amp, per accenderla occorre una corrente della potenza di:*

$$w = 120\ V \times 1{,}5\ amp = 180\ watt.$$

Si ricordi (Vol. 1° - § 122) che *1 HP equivale a 736 watt*; quest'equivalenza sussiste se i watt sono di potenza della corrente elettrica.

100 watt si chiamano *Ettowatt* e si scrive *hw*.
1000 » » *Kilowatt* » » *kw*.

281. **Energia elettrica.** — La potenza della corrente non dipende dalla durata di questa. Se invece fissiamo il tempo per cui si usufruisce di una data corrente, allora dalla potenza si ricava il lavoro eseguito in quel tempo. Ricordiamo infatti che *la potenza è il lavoro eseguito nell'unità di tempo;* cioè (Vol. 1° - § 122-15):

$$W = \frac{L}{T}\,; \qquad \text{da cui:} \qquad L = W\,T\,.$$

Si ottiene in tal modo la misura pratica dell'**energia elettrica.** Così:

100 *watt* per la durata di 1 ora formano 1 *Ettowatt-ora* (*hwo*),
1000 » » » » 1 *Kilowatt-ora* (*kwo*);

che sono i dati che si valutano per il costo dell'energia elettrica nelle sue applicazioni, e che sono misurati dai **contatori elettrici.**

Problema. — *Calcolare il costo giornaliero (8 ore al giorno) di un motore elettrico da 5 HP, supponendo il rendimento elettrico dell'87%, ed il costo dell'energia elettrica di L. 0,36 il kwo; e qual'è l'intensità della corrente che lo attraversa, se è inserito in una linea a 225 V.*

Soluzione. — Tale motore dovrebbe assorbire teoricamente:

$$W_1 = (5 \times 736)\ watt = 3680\ w.$$

Col rendimento dell'87% assorbe in pratica:

$$W_2 = \frac{3680}{0{,}87}\ w = 4{,}23\ kw\,; \qquad \text{e in 8 ore:} \qquad W_3 = (4{,}23 \times 8)\ kwo = 33{,}84\ kwo.$$

Il suo costo orario è perciò:

$$C = \text{L.}\ (33{,}84 \times 0{,}36) = \textbf{L. 12,20.}$$

Si ha inoltre, chiamando i l'intensità di corrente richiesta, per la 2):

$$4230\ w = 225\ V \times i, \qquad \text{da cui:} \qquad i = \frac{4230}{225}\ amp = \textbf{18,8 amp.}$$

Problemi da risolvere.

1. Qual'è la potenza della corrente richiesta da un motore elettrico, che funziona a 225 *V* e 30 *amp*?
2. Quanti *ampère* si chiedono per alimentare un gruppo di lampade a 120 *V*, se l'energia totale assorbita da esse è di 2,5 *kw*?
3. Qual'è la *f.e.m.* necessaria per alimentare un motore, che assorbe 2,5 *amp* con la potenza di 5 *kw*?
4. Quanto spende al mese una famiglia per tenere accese in media per 3 ore giornaliere 5 lampadine elettriche da 120 *V* e 0,5 *amp*. ciascuna, se l'energia elettrica si paga a L. 0,15 l'*hwo*?

Effetti termici della corrente elettrica.

282. **Calore svolto dalla corrente - Legge di Joule.** — Tutte le volte che la corrente elettrica percorre un conduttore, per il fatto che questo offre sempre resistenza, una parte dell'energia della corrente si trasforma in calore, Così, p. es., facendo passare una corrente di qualche ampère in un sottile filo di ferro, esso può arroventarsi ed anche fondere.

La produzione di calore è pertanto una trasformazione dell'energia elettrica in calorifica. Per il noto principio della conservazione dell'energia (Vol. 1° - § 119), deve esservi equivalenza tra l'energia calorifica ottenuta e quella elettrica che la produce. Cioè, se q è la quantità di calore prodotta in t secondi da una corrente di w Watt, e se J è l'equivalente meccanico della caloria (Vol. 1° - § 315), sarà $\frac{qJ}{t}$ l'energia calorifica di q calorie per ogni secondo, e quindi in t secondi, per l'equivalenza suddetta;

1) $$qJ = wt, \qquad \text{da cui:} \qquad q = \frac{1}{J} wt.$$

Ora: $w = ei$; e per legge d'Ohm $e = ir$; sostituendo si ha: $w = i^2 r$; e quindi per la 1):

2) $$q = \frac{1}{J} i^2 rt\,.$$

Essendo $J = 427$ *kgm.* ed 1 *kgm.* = 9,8 *joule* (Vol. 1° - § 105), è: $J = 4160$ *joule per caloria*, o 4,16 *joule per piccola caloria*; e per la 2):

3) $$q = \frac{1}{4{,}16} i^2 rt = 0{,}24\, i^2 r\, t\,,$$

che è la **legge di Joule** [1] enunciata nel 1841:

la quantità di calore svolto dalla corrente è proporzionale direttamente: al quadrato dell'intensità della corrente, alla resistenza del conduttore e al tempo per cui passa la corrente.

Nella 3): t è espresso in *secondi*, r in *ohm*, i in *ampère* e q in *piccole calorie*.

283. **Temperatura del circuito.** — Per quanto si è visto avanti, la corrente elettrica passando nei fili conduttori che la distribuiscono, produce in essi sempre una certa quantità di calore. Questo è da considerarsi come energia perduta, che dobbiamo ridurre al minimo. Perciò dobbiamo ridurre la resistenza del conduttore al valore più piccolo, impiegando come sostanza il rame elettrolitico, che (§ 268) è fra i metalli usuali il miglior conduttore. Ricordando (§ 269) che allo zero assoluto la resistenza dei conduttori metallici si annulla, avverrà che a tale temperatura la corrente potrà attraversare il conduttore senza perdita di energia e senza produrvi calore. Avverrà

---

(1) Joule James; n. a Manchester nel 1818, m. a Sales (Londra) nel 1889.

cioè che si potrà far passare in un filo conduttore sottilissimo quanto un capello, una corrente intensa quanto si vuole, anche di molte migliaia di ampère, senza che il filo si riscaldi.

Nella pratica invece occorre che l'intensità della corrente non superi un certo valore, compatibilmente alla sezione del conduttore; altrimenti questo potrebbe riscaldarsi eccessivamente, con pericolo di incendio se è vicino a corpi infiammabili. La densità di corrente (§ 257) ammissibile nelle condutture ordinarie, è di circa 3 amp. per mm^2 di sezione del filo.

Ma non si deve confondere la quantità di calore svolta con la temperatura assunta dal conduttore; questa dipende dall'equilibrio tra il calore ricevuto e quello irradiato nell'ambiente; dipende cioè dall'intensità della corrente e dalle dimensioni e natura del conduttore.

Infatti, se il filo non perdesse calore, quello svolto continuamente dalla corrente farebbe crescere sempre più la temperatura di esso, fino a farlo fondere. Invece avviene che a misura che la temperatura sale, aumenta sempre più per la legge di Newton (Vol. 1° - § 249) la quantità di calore irradiato; arriva un momento che il corpo perde tanto calore quanto ne acquista dalla corrente; a partire da questo momento la temperatura rimane stazionaria.

Ora, il calore irradiato dipende dalla superficie del corpo e dallo stato di questa; quindi se il filo è sottile e di alta resistenza specifica, cioè per una data resistenza ha piccola superficie irradiante, acquista una temperatura più elevata. Concludendo: un filo sottile si riscalda maggiormente di uno grosso; ed un filo di sostanza di alta resistenza specifica, più di uno di sostanza più conduttrice.

Illuminazione elettrica.

284. **La luce elettrica.** — Come applicazione importante del calore svolto dalla corrente, si ha l'*illuminazione elettrica*; che oggi per la sua comodità, eleganza, igiene ed economia, ha sostituito quasi dappertutto i vecchi sistemi di illuminazione con sostanze combustibili.

L'illuminazione elettrica può ottenersi con **lampade ad incandescenza** e con **lampade ad arco.**

285. **Lampade ad incandescenza.** — In queste lampade la luce è prodotta da un filo conduttore, reso incandescente dalla corrente. Occorre naturalmente un filamento che resista alle altissime temperature. Edison [1] l'inventore di queste lampade nel 1878, fece uso di un filamento di carbone, che ricavava dalla carbonizzazione delle fibre del bambù; più tardi questo filo si fabbricava con maggior tenacia e regolarità da una pasta di celluloide, trafilata in forma di filo sottile e carbonizzata fuori del contatto dell'aria.

---

(1) Edison Tomas Alva, l'inventore più celebre dei nostri tempi; n. a Milan nell'Ohio (S. U. d'America) nel 1847, m. a West-Orange, nel Jersey, nel 1931.

Il filamento di carbone, ricurvo ad ansa o a spirale, è racchiuso in un piccolo globo di vetro (Fig. 396); in questo si fa il vuoto, spinto alla massima rarefazione, sia per impedire al carbone di bruciare, sia per evitare la perdita di calore, sottratto per conduzione da un gas in contatto col filo incandescente.

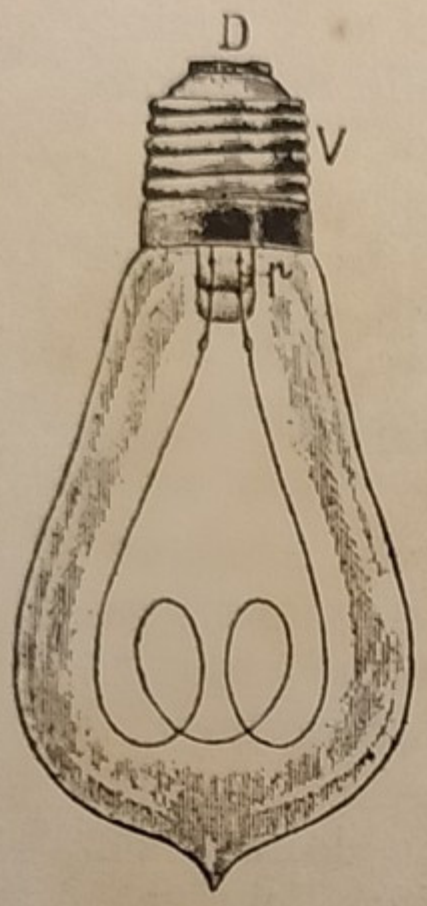


Fig. 396.

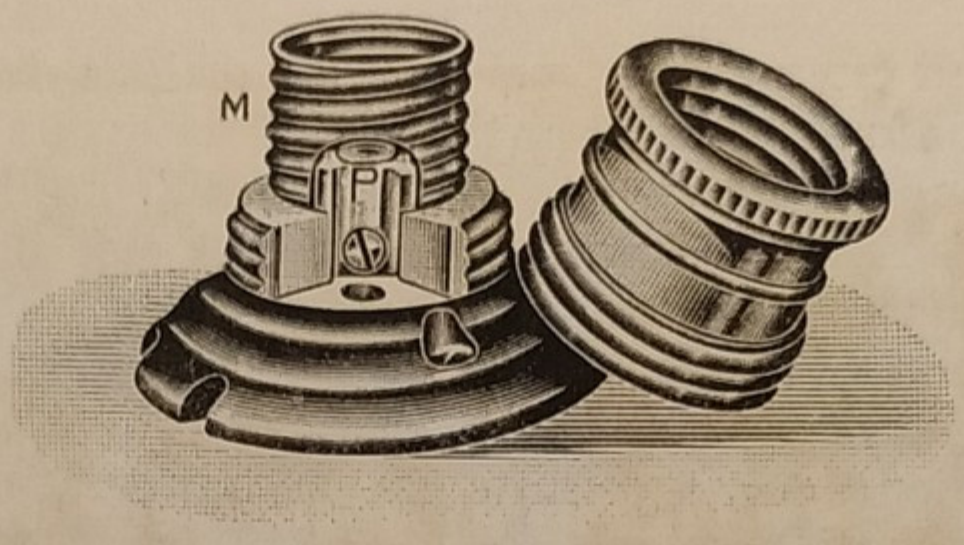


Fig. 397.

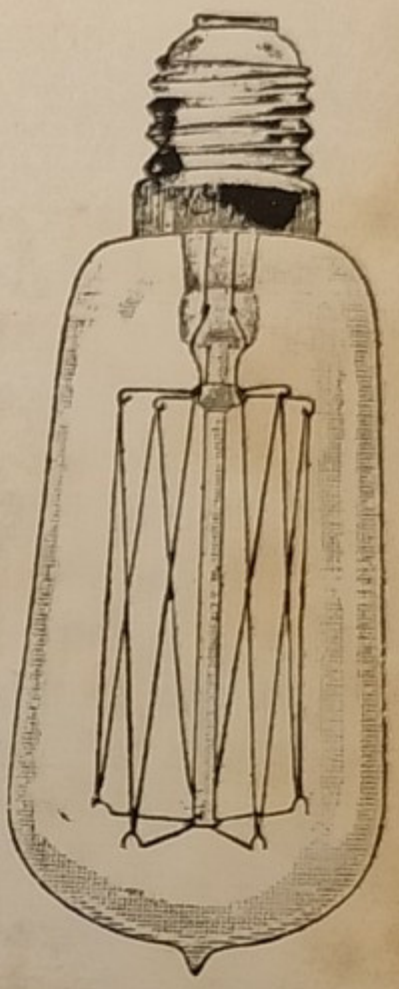


Fig. 398.

I due capi del filo di carbone sono attaccati a due fili di platino *p*, saldati nel vetro, e collegati uno con una ghiera a vite *V*, l'altro con un dischetto *D*, entrambi di ottone, ma isolati l'uno dall'altro. Questa parte della lampada si chiama **attacco o peduncolo**; essa si avvita al **portalampada** (Fig. 397), nel quale i capi dei due reofori che portano la corrente comunicano l'uno con un manicotto di ottone a vite *M*, l'altro con una placchetta pure di metallo *P*. Avvitando la lampada al portalampada, si stabiliscono così automaticamente le comunicazioni tra i capi dei reofori e le estremità del filamento di carbone, ed in questo passa la corrente.

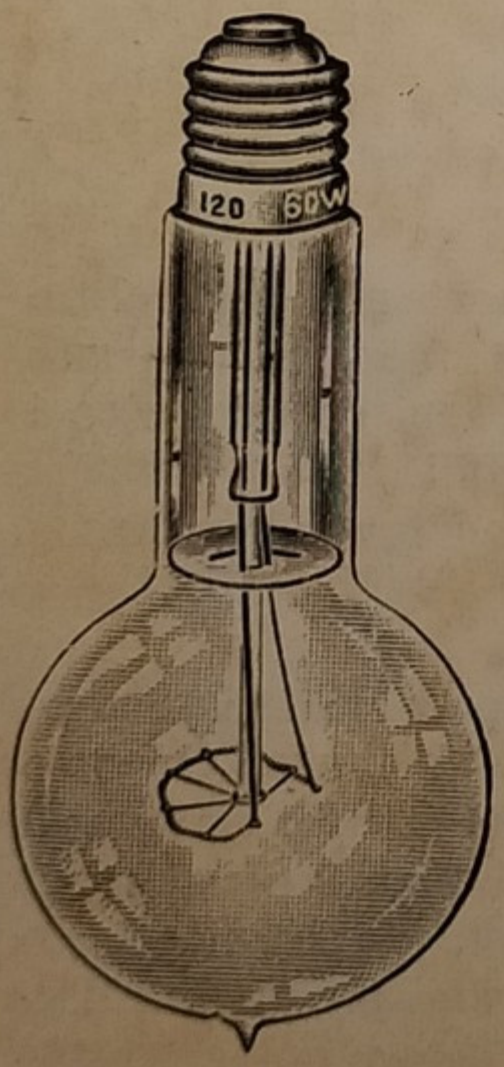


Fig. 399.

Si era sperato che una lampada a filamento di carbone potesse conservarsi indefinitamente, poichè il carbone è infusibile. Ma purtroppo, se il carbone non fonde, però si disgrega; onde ne partono continuamente particelle che vanno a depositarsi sul vetro annerendolo, e il filo stesso si assottiglia continuamente fino a rompersi. Queste lampade non durano perciò, in media, più di 600 ore; e poichè per evitare una disgregazione troppo rapida il filamento non deve oltrepassare la temperatura di 1500°, la luce emanata è piuttosto giallognola ed il consumo di energia piuttosto elevato; circa *3,5 watt per ogni candela* (§ 81) di luce.

Oggi se ne adopera ancora qualcuna, quando siano soggette a scosse, essendo più resistenti alla rottura; ma da qualche anno sono state sostituite dalle lampade **a filamento metallico**, che consumano solo *1 watt circa per candela*. In queste il filamento è di **tungsteno**, metallo assai refrattario (fonde oltre i 3000°), che può portarsi a circa 2200° e quindi può fornire luce più viva. La Fig. 398 rappresenta una di queste lampade, la cui durata può essere di più migliaia di ore.

Recentemente poi si sono fatte lampade in cui il filo di tungsteno è avvolto in forma di finissima spirale, e nel globetto vi è dell'azoto (Fig. 399); questo per la pressione a cui si trova, attenua la disgregazione del filo (che nelle lampade precedenti è favorita dal vuoto) ed il conseguente annerimento interno del globetto; e perciò permette di portare il filo a temperatura ancora più elevata (circa 2600°). Il consumo scende così a circa $\frac{1}{2}$ *watt per candela*; da ciò il nome di **lampada mezzowatt.** In pratica una lampada mezzowatt da 50 cand. assorbe 40 *w*, e una da 100 cand. assorbe 60 *w*.

286. **Lampade ad arco.** — L'inglese Davy [1] nel 1821 trovò, che mettendo due bacchette di carbone in comunicazione coi poli di una sufficiente pila (la cui *f.e.m.* sia almeno di 50 *V*), facendone toccare le punte e poi subito scostandole di qualche millimetro, si forma fra di esse una fiammella caldissima (circa 4000° *C*), chiamata **arco voltaico,** (Fig. 400). Le punte del carbone si arroventano ad altissima temperatura; la punta del carbone positivo sorpassa i 3000° ed emana una luce vivissima, abbagliante, bianchissima, che è circa i $^9/_{10}$ della luce totale; quella del carbone negativo è attorno ai 2200° ed anch'essa emana luce.

Si è utilizzato questo principio per costruire una lampada, che fu chiamata **lampada ad arco,** (Fig. 401). In

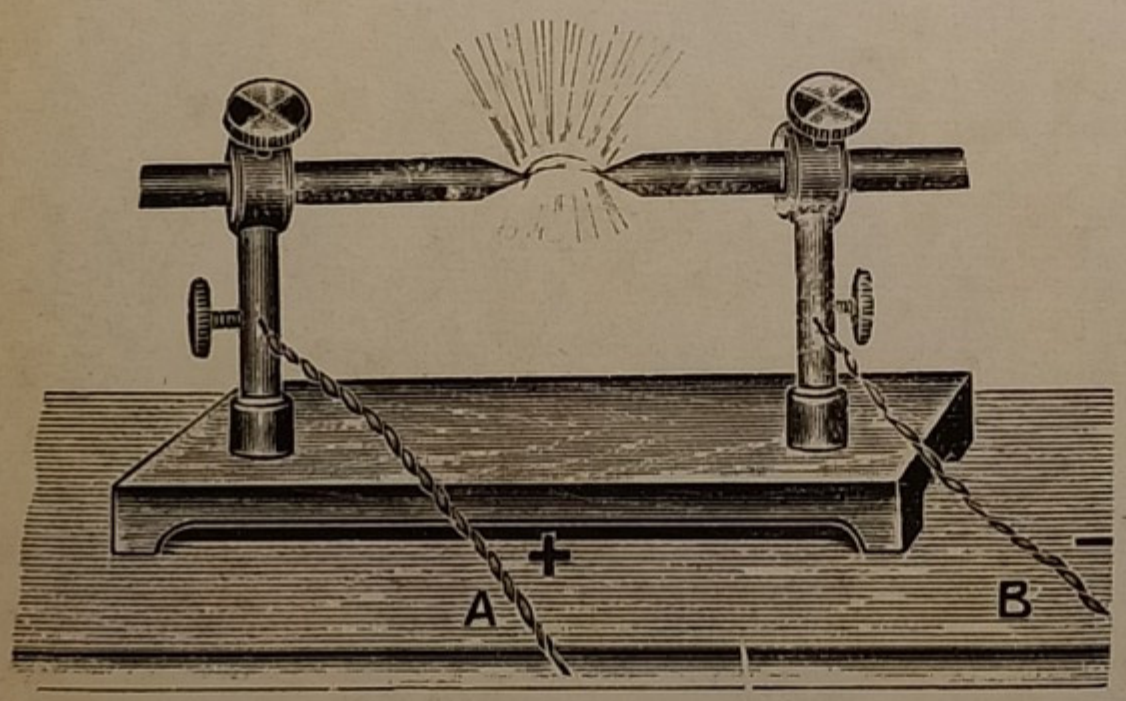


Fig. 400.

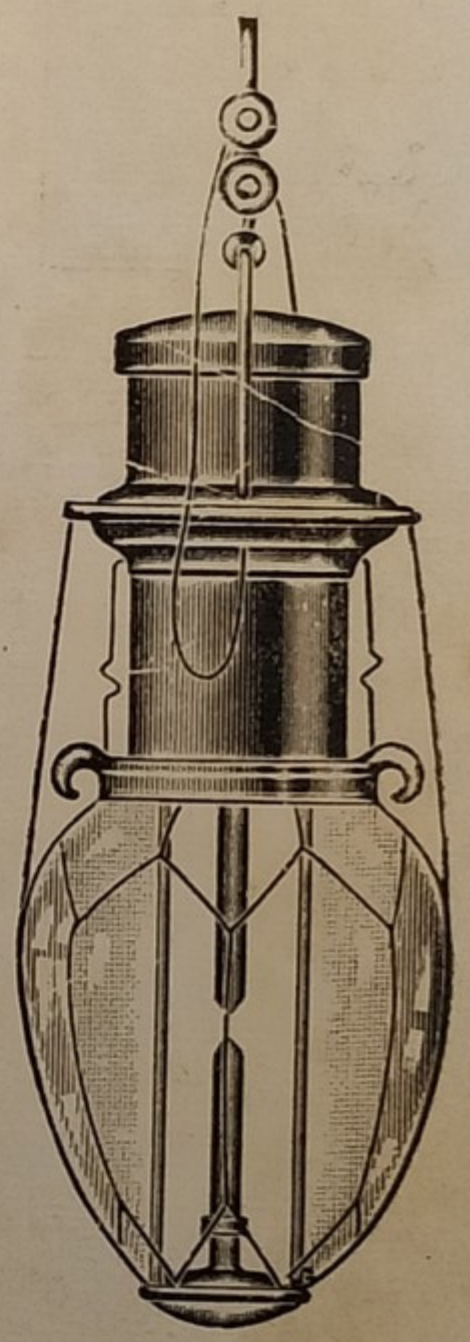


Fig. 401.

essa i due carboni si dispongono solitamente in direzione verticale; in alto il carbone positivo (cioè quello messo in comunicazione col polo + della pila) perchè proietti meglio dalla punta la luce in basso; e sotto il carbone negativo. I carboni, essendo incandescenti nell'aria, bruciano e si consumano, per circa 5 cm. ogni ora fra tutti e due; occorre perciò un meccanismo che:

1. metta in contatto le punte al momento dell'accensione;
2. scosti subito dopo le punte a 4-5 mm. di distanza;

---

(1) Davy Sir Humphry, presidente della Soc. Reale di Londra, n. a Panzance (Cornovaglia) nel 1788, m. a Ginevra nel 1829.

3. mantenga le punte a questa distanza, avvicinando lentamente i due carboni, man mano che si consumano.

Fig. 402.

Questo meccanismo è chiamato **il regolatore** della lampada; funziona per virtù di *elettrocalamite* (§ 301), ed è riposto nella scatola cilindrica, chiusa, che sta sopra la lampada; non lo descriviamo dettagliatamente.

Il carbone positivo s'incava alla punta, ove si forma una fossettina denominata **cratere** (Fig. 402); mentre quello negativo si appuntisce. Si vedono inoltre frequentemente delle particelle incandescenti di carbone portarsi dal carbone positivo a quello negativo; per questo fatto, e per la maggiore temperatura, il carbone positivo si consuma circa il doppio dell'altro. Perciò la bacchetta del carbone positivo si suole fare di sezione doppia (cioè diametro circa una volta e mezzo) del carbone negativo.

La luce emanata da questa lampada non si diffonde uniformemente (§ 82); ma si proietta in basso con la massima intensità nella direzione di 45° circa con la linea dei carboni; per diffonderla più uniformemente si circondano i carboni con un vetro opalino, che però assorbe circa un quarto della luce.

Le lampade ad arco sono sorgenti di luce molto intensa, ma non del tutto costante; erano adoperate fino a pochi anni fa per l'illuminazione delle vie e degli opifici, perchè consumano solo *0,5 watt per candela*. Ma oggi sono state quasi completamente sostituite dalle *mezzowatt* ad incandescenza, che pur consumando pari energia a parità di luce, forniscono luce più uniforme e più costante, e non richiedono, come quelle ad arco, il ricambio giornaliero dei carboni.

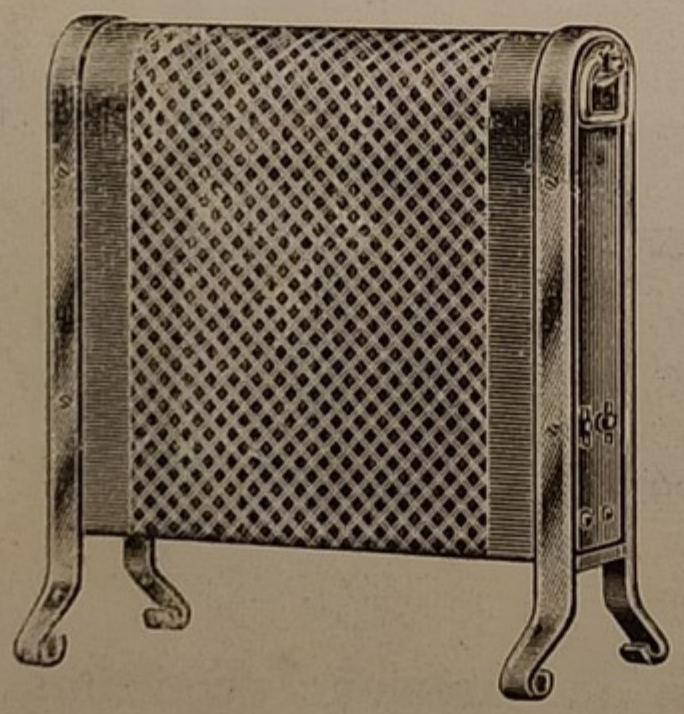


Fig. 403.

Fig. 404.

Facendo scoccare l'arco tra elettrodi di mercurio, anzichè di carbone, in un tubo ove sia stato fatto il vuoto, si ottiene una luce verdognola, ricca di raggi ultravioletti, (§ 116). Questi tubi sono di quarzo, perchè il vetro è semiopaco ai raggi ultravioletti. Essi si applicano per scopi industriali e terapeutici, come abbiamo accennato nel § 116.

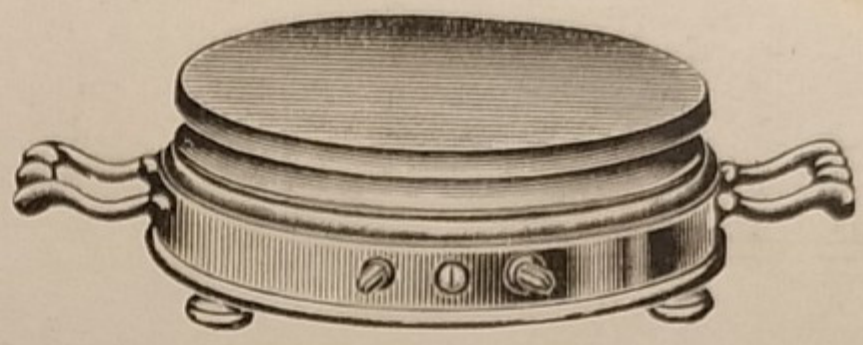


Fig. 405.

287. **Altre applicazioni.** — Il calore svolto dalla corrente elettrica è stato pure utilizzato per riscaldamento degli ambienti e per altri usi domestici. Si adoperano a questo scopo delle spirali di filo di grande resistenza [1], avvolte su sostegni isolanti e incombustibili (*mica*, *steatite*, ecc.). Si costruiscono così *stufe elettriche* che possono collocarsi ovunque (Fig. 403), *cucine* e *scaldacqua* (Fig. 404), *fornelli da cucina* (Fig. 405), *ferri da stiro* (Fig. 406), ecc. Tali apparecchi oggi sono considerati di lusso, e usati solo limitatamente, perchè il calore svolto con questo mezzo costa notevolmente di più di quello prodotto dai comuni combustibili (vedasi il problema a fine del paragrafo). Ma il loro uso si diffonde sempre più, man mano che il costo dell'energia elettrica va diminuendo. La Fig. 407 mostra un *forno per pasticceria*; se ne costruiscono anche più grandi per la cottura del pane.

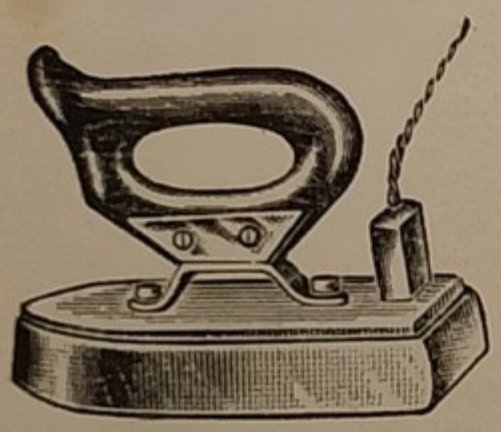


Fig. 406.

Fig. 407.

Le **valvole fusibili** sono scatolette contenenti un tappo, in cui è posto un sottile filo di metallo, inserito in ciascun filo conduttore della corrente.

(1) Si adopera oggi generalmente il *nichel-cromo* o *nicromo*, che è una lega di queste ue sostanze.

Se questa per guasti, contatti tra i due fili che la conducono (**cortocircuito**) o altre cause, acquista un valore troppo forte, tanto da arroventare e danneggiare i conduttori, questo filo sottile fonde e interrompe così in quel punto il passaggio della corrente. La Fig. 408 mostra una *valvola Siemens bipolare;* nella parte sinistra montata; a destra smontata, senza il coperchio Q, e tolto il tappo fusibile T; F è il filo fusibile.

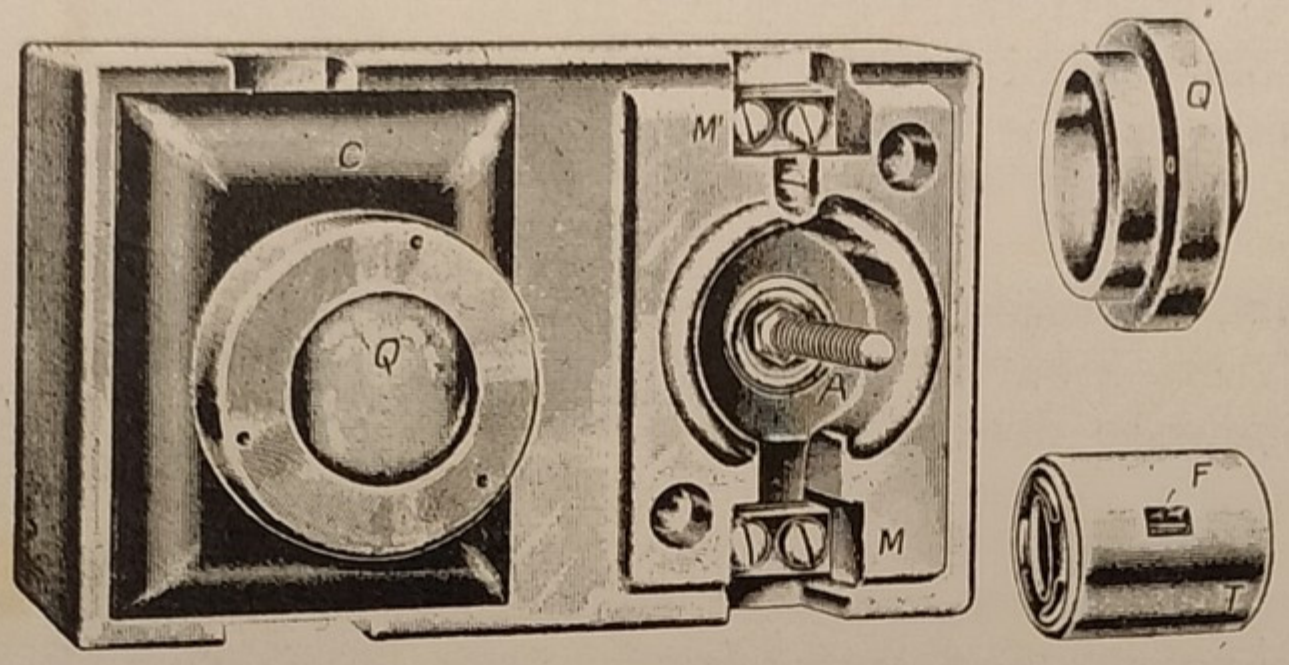


Fig. 408.

Problema. — *Se per scaldare d'inverno una stanza si richiedono kg. 1,5 di coke all'ora, qual'è il costo per riscaldare la stessa stanza con la corrente elettrica?*

Soluzione. — Kg. 1,5 di coke bruciando producono: $(1{,}5 \times 6500)$ *cal.* $= 9750$ *cal.* Ammesso che si adoperi una stufa col rendimento dell'80 %, il calore utilizzato sarà:

$$q = (9750 \times 0{,}80)\ cal. = 7800\ cal. = 7800000\ picc.\ cal.$$

Per produrre eguale quantità di calore con la corrente elettrica, deve essere per la 3) del § 282, ricordando che $i^2 r = w$ e che 1 *ora* $= 3600$ *sec.*:

$$7800000 = 0{,}24\, w \times 3600; \qquad \text{da cui:}$$

$$w = \frac{7\,800\,000}{0{,}24 \times 3600}\ watt\text{-}ora = 9\,028\ watt\text{-}ora = 9\ kwo \text{ circa.}$$

Ammesso che il costo del *kwo* per riscaldamento sia di L. 0,36, avremo il costo orario di:

$$\text{L. } (0{,}36 \times 9) = \textbf{L. 3,25} \text{ circa.}$$

mentre kg. 1,5 di coke, a L. 18 il quintale, costerebbero solo L. 0,27.

Cioè il *riscaldamento elettrico costerebbe circa 12 volte che col carbone*; questo esempio fa comprendere perchè oggi non sia ancora conveniente adoperare l'energia elettrica per il riscaldamento degli ambienti.

288. **Forni elettrici.** — Sono anche diffusi nell'industria i *forni elettrici*, nei quali si utilizza l'enorme temperatura dell'arco voltaico (circa 4000°) che è la temperatura più alta che si sa produrre artificialmente. Con questo mezzo si possono raggiungere temperature elevatissime, non raggiungibili in altro modo; quindi il maggior costo dell'energia elettrica non è più un ostacolo al suo impiego. È con tali forni che si estrae l'alluminio dalle argille (§ 254), si fabbricano il *carburo di calcio*, il *carborundum*, ed alcuni concimi chimici (la *calciocianamide*, ecc.), si ottiene l'ossidazione dell'azoto per la fabbricazione dell'*acido nitrico*, si producono alcune qualità di *acciaio*, ecc. La Fig. 409 mostra una serie di forni Birkeland, in uno Stabilimento di Notodden (Norvegia), impiegati per la produzione dell'acido nitrico.

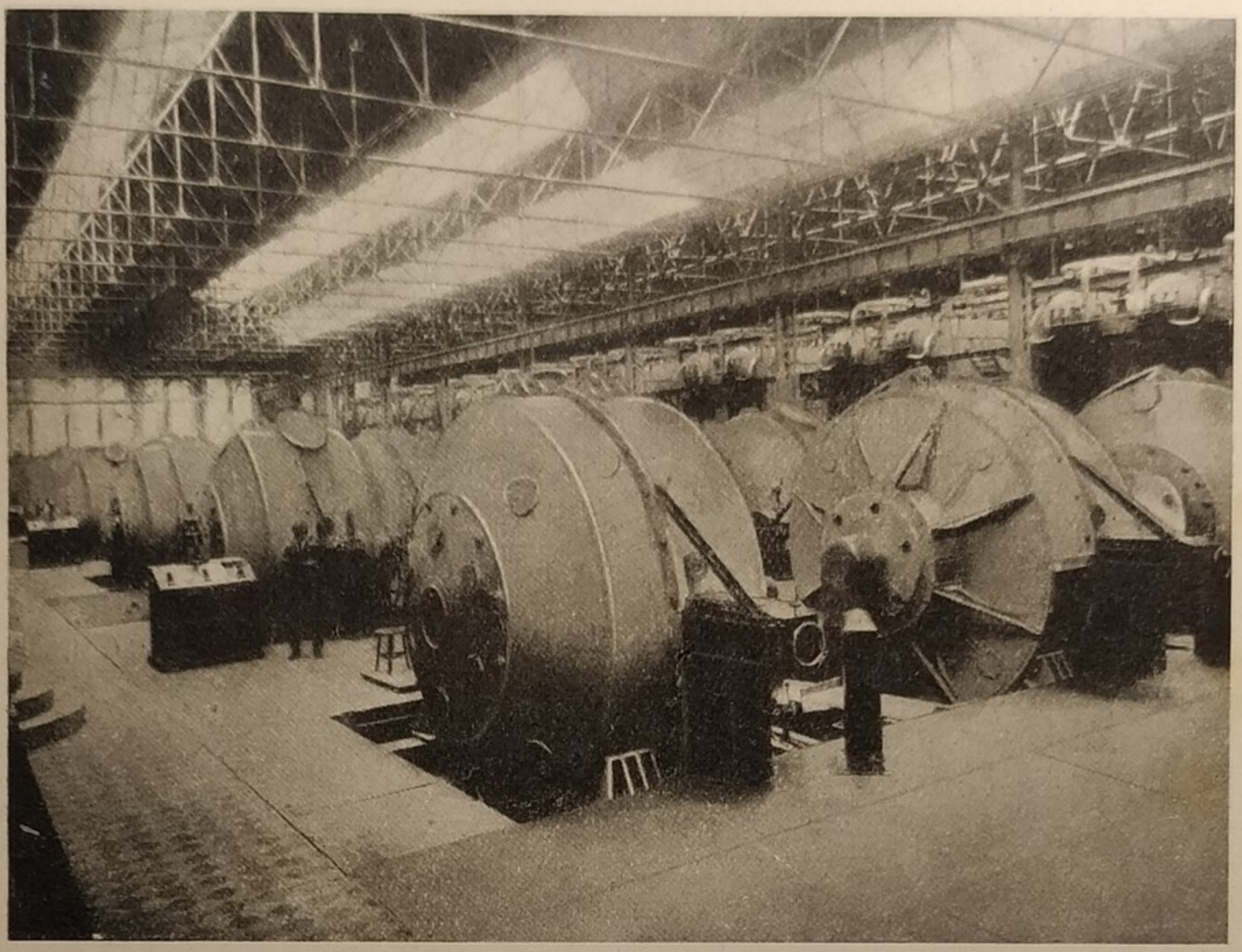


Fig. 409.

La Fig. 410 rappresenta un piccolo forno elettrico per laboratorio; l'arco avviene in B tra le punte dei carboni $C_1 C_2$, nell'interno di un blocco refrattario, dove si mettono le sostanze da sottoporre all'azione del calore. Nell'industria però si fa uso di forni assai più grandi, che assorbono energia elettrica corrispondente a migliaia di *HP*. La Fig. 411 mostra un grande forno elettrico adoperato nella metallurgia per la produzione di speciali qualità di acciaio. Col forno elettrico, sottraendosi l'acciaio fuso dal contatto del carbone, può meglio dosarsi la percentuale di carbonio che è contenuta nell'acciaio, ed ottenere perciò qualità di questo ben costanti e ben note.

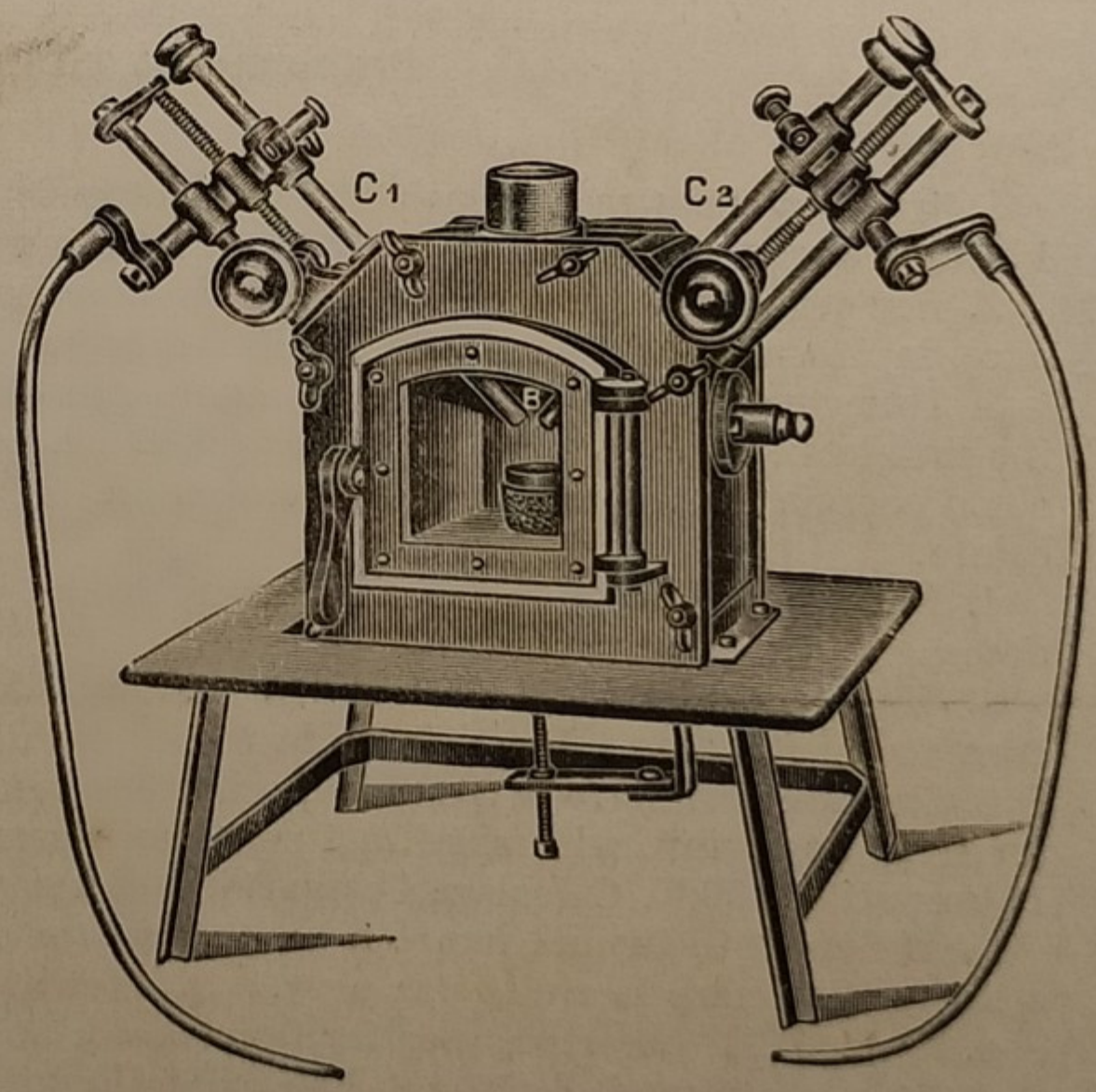


Fig. 410.

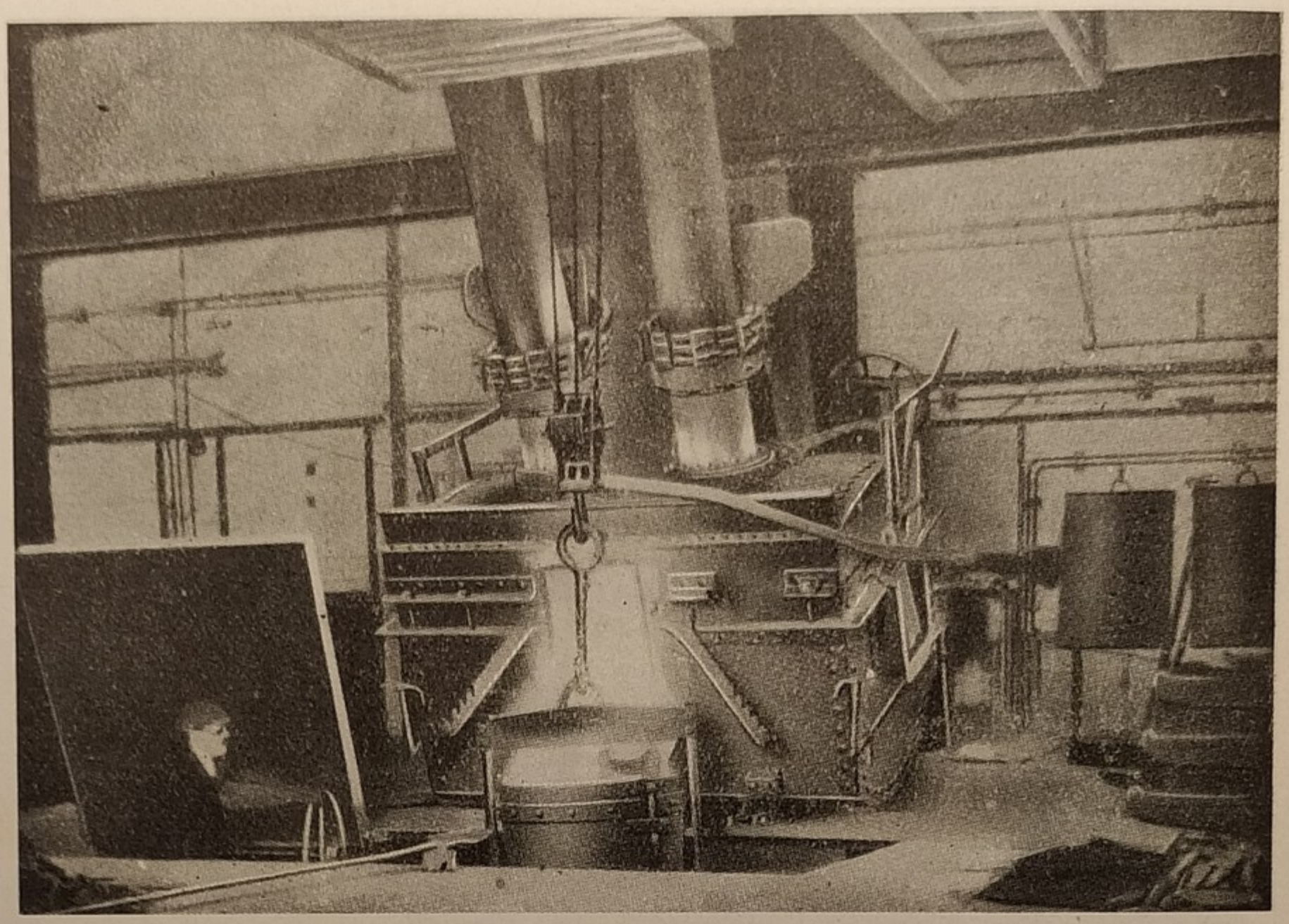


Fig. 411.

Problemi da risolvere.

1. Quale dev'essere l'intensità di una corrente a 125 *V*, per portare all'ebollizione 1 litro d'acqua, inizialmente a 15° *C* in 12 minuti?

2. Per quanti minuti occorre far passare una corrente di 200 *V* e 15 *amp*, per riscaldare da 15° a 40° un bagno di 150 litri d'acqua?

3. Paragonare il costo del riscaldamento con carbone (7000 *cal.* per ogni kg. a L. 18 il quintale, rendimento 60%), con gas (5000 *cal.* per m³, a L. 0,70 il m³, rendim. 75%) e con energia elettrica (L. 0,36 il *kwo*, rendim. 98%), per ottenere pari produzione di calore.

4. Determinare la quantità di calore svolto ad ogni ora da una lampada ad incandescenza a filo di carbone da 16 cand.

5. Una lampada ad incand. da 16 candele, filo di carbone, funziona a 65 *V* con corrente di 0,8 amp. Determinare la resistenza del filo a 0° ed il consumo unitario.

6. In un calorimetro a pareti opache, bene isolato, contenente 300 g. d'acqua, è immersa una lamp. ad incand. a tungsteno (normale) da 50 cand., che funziona per 10 minuti a 120 *V*. Calcolare l'elevazione di temperatura dell'acqua.

7. Il filamento di una lamp. a tungsteno (normale), ha la resistenza di 242 *oh*, a 2200°. Calcolare la resistenza a 0°, e la intensità luminosa, se funziona a 120 *V*.

8. Quanti *HP* occorrono per far funzionare: 50 lamp. incand. da 100 cand. *mezzo-watt*, 25 lamp. incand. da 32 cand. filo metallo normali, 8 lamp. incand. da 16 candele filo carbone, 10 lamp. ad arco da 55 *V* ed 8 *amp.*?

9. Un forno elettrico consuma 2000 *amp.* a 50 *V*. Calcolare in *HP* la potenza occorrente, e quale deve essere la portata di una cascata d'acqua, di 4 m. d'altezza, per fornire la potenza occorrente, se il rendimento totale dell'impianto è del 75%.

Correnti termoelettriche.

289. **Corrente termoelettrica.** — Una delle leggi di Volta (§ 237) diceva che: in un circuito chiuso di soli metalli la *f.e.m.* risultante è zero, e quindi non v'è corrente, *purchè la temperatura sia eguale in ogni punto del circuito.* Si sottintende dunque che la *f.e.m.* c'è, se la temperatura è diversa nei diversi punti. Così infatti avviene:

Si prenda, ad es., un circuito chiuso, formato con un filo di ferro ed uno di rame, congiunti nei punti A e B (Fig. 412); se si stabilisce fra queste congiunture una differenza di temperatura, p. es., scaldando A, si genera in tale circuito una corrente, che si chiama **corrente termoelettrica.** Si chiama **positivo** il metallo a cui viene la corrente *attraverso la saldatura calda*; nell'es. precedente il ferro è positivo rispetto al rame. I due metalli insieme costituiscono una **coppia termoelettrica.**

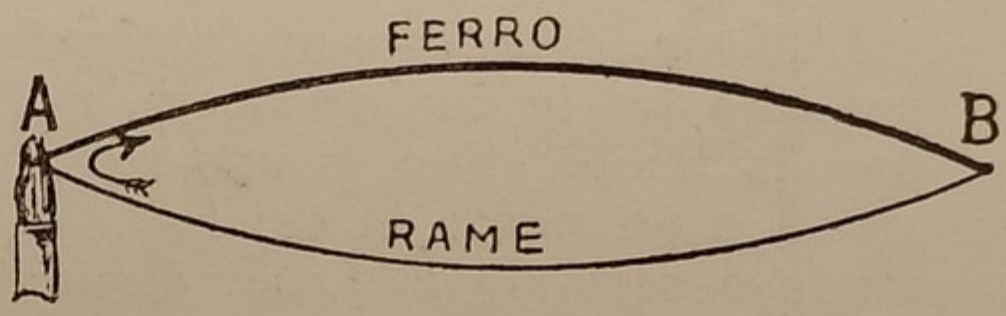


Fig. 412.

Il fenomeno precedente fu scoperto da Seebeck [1] nel 1821, e può verificarsi con l'apparecchio della Fig. 413, costituito da una sbarretta di bismuto $B'B$, a cui è saldata una lamina $B'C'CB$ di antimonio; in modo da formare (in sezione) un rettangolo, nel cui interno è sospeso un ago magnetico NS. Si orienta il rettangolo in modo che l'ago sia contenuto nel suo piano; indi si scalda una delle due saldature, p. es. B: si vedrà l'ago deviare indicando una corrente che circola nei due metalli.

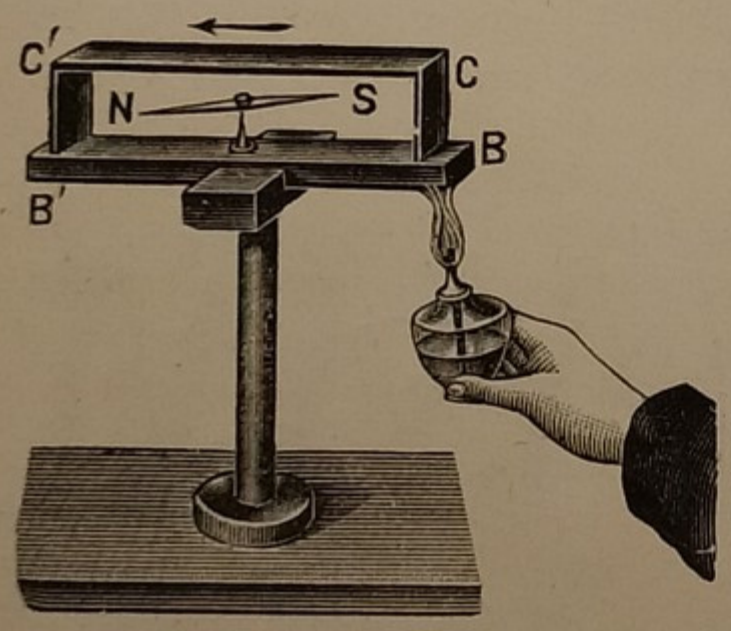


Fig. 413.

Le *f.e.m.* generate nelle coppie termoelettriche sono molto piccole; quella della coppia bismuto-antimonio, che è una delle maggiori, è solo 0,000117 $V.$ (117 *microvolta*) per ogni grado di differenza di temperatura fra le due congiunture.

La spiegazione della causa della corrente termoelettrica è facile con la teoria elettronica; pensando che la variazione di temperatura di una delle congiunture, provoca una variazione dell'affinità elettronica dei due metalli della coppia (§ 238). Avviene quindi un flusso di elettroni da un metallo all'altro, che forma la corrente termoelettrica.

290. **Potere termoelettrico.** — Si dice *potere termoelettrico* di un metallo rispetto al piombo, la *f.e.m.* che si genera in una coppia di quel metallo col piombo, se la differenza di temperatura fra le saldature è di $1°C.$

---

(1) Seebeck Ludwig; n. a Jena nel 1805, m. a Dresda nel 1849.

Riportiamo il potere termoelettrico di alcuni metalli in *microvolta* (μV), osservando che nella tabella seguente i metalli sono ordinati in modo che ciascuno di essi è negativo rispetto a quelli che seguono e positivo rispetto a quelli che precedono.

—Bismuto	circa	93
Pachfong	»	11,75
Mercurio	»	0,42
Piombo	»	0
Rame	»	0,10
Platino	»	0,9
Argento	»	3,0
Ferro	»	17,0
+Antimonio	»	24

La *f.e.m.* della corrente termoelettrica cresce con la differenza di temperatura tra le due saldature, ma non proporzionalmente; così, tenendo fissa la temperatura di una saldatura e aumentando quella dell'altra, si arriva a un punto in cui la *f.e.m.* non cresce più (**punto neutro**); seguitando a scaldare la *f.e.m.* diminuisce, arriva ad annullarsi (**punto d'inversione**) e poi si inverte. Per la coppia ferro-rame il punto neutro è a circa 275° *C*, e il punto d'inversione a 550° *C*.

La verifica sperimentale si può fare fissando ai morsetti di un *galvanometro* (§ 304) i capi di due fili, uno di rame e l'altro di ferro, congiunti insieme all'altro capo. Scaldando lentamente questa congiunzione, fino ad arroventarla, si vedrà nel galvanometro dapprima l'ago deviare in un senso, raggiungere una deviazione massima, poi tornare indietro e ad un certo momento deviare dalla parte opposta.

291. **Pile termoelettriche.** — Per ottenere *f. e. m.* più rilevanti, occorre riunire *in serie* molte coppie. La **pila Melloni** è infatti formata di tante sbarrette alternativamente di bismuto e di antimonio, saldate alle estremità (Fig. 414); in tal modo le saldature 1-3-5..., cioè quelle di posto dispari, rimangono tutte da una parte, e quelle di posto pari dall'altra. Basta scaldare tutte le saldature di posto dispari, oppure quelle di posto pari, per ottenere corrente. Adoperando un galvanometro sensibilissimo, basta un riscaldamento minimo, solo di qualche decimillesimo di grado, inavvertibile con i termometri ordinarî, per ottenere una deviazione apprezzabile; la pila termoelettrica serve in tal caso come termometro sensibilissimo [1].

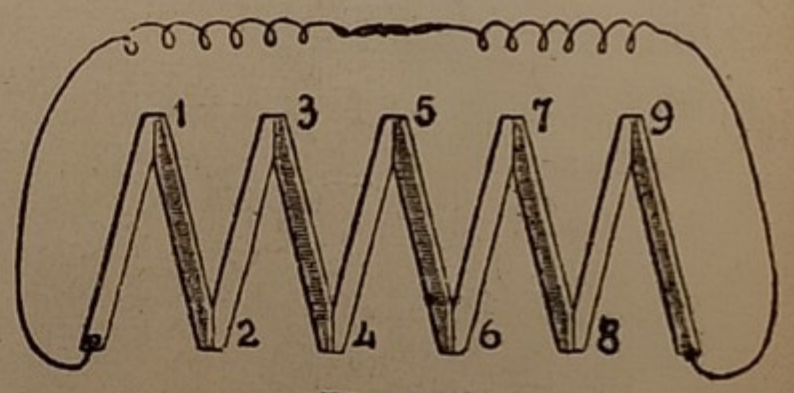


Fig. 414.

La Fig. 415-*a* rappresenta la pila termoelettrica adoperata dal Melloni per le sue classiche esperienze sul calore radiante.

---

(1) Un termometro termoelettrico posseduto dall'Osservatorio astronomico di Monte Wilson, permette di valutare variazioni di temperatura di un decimilionesimo di grado; combinato col telescopio, potrebbe misurare il calore proveniente da un fiammifero alla distanza di 150 km.!

Una coppia *platino-platinorodio*, permette invece di misurare alte temperature, fino a 1600° *C*, e costituisce un **pirometro termoelettrico**, (*pirometro di Le Chatelier*).

Si sono infine costruite anche pile termoelettriche in sostitu-

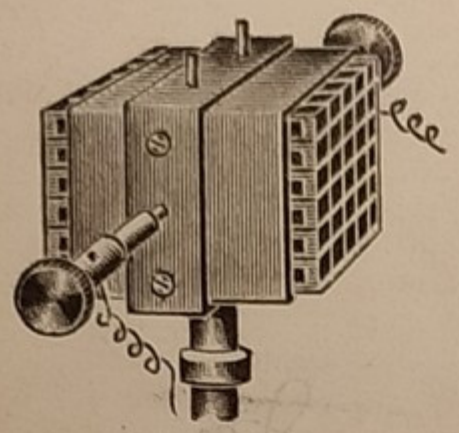


Fig. 415-(*a*).

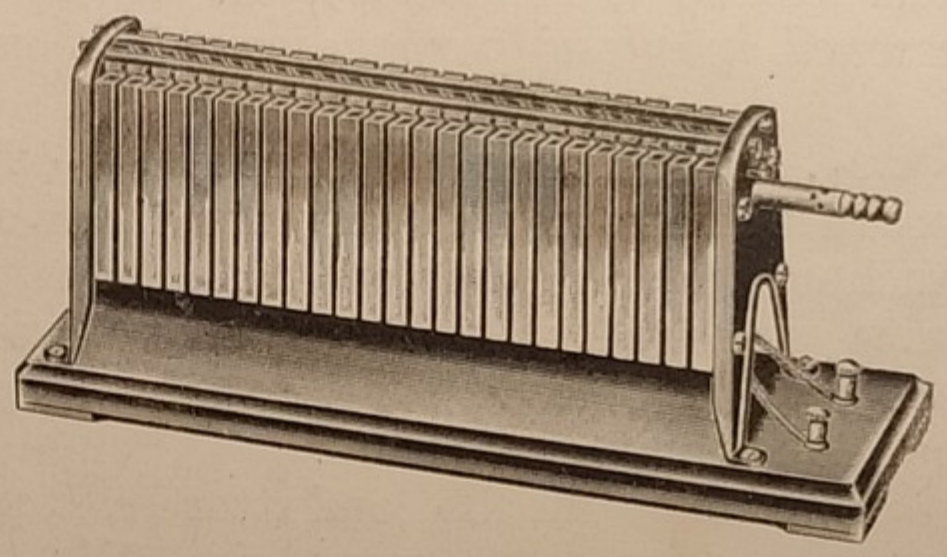


Fig. 415-(*b*).

zione delle pile a liquidi; sono comode, perchè basta accendere una fiamma a gas o a spirito, per avere corrente; ma la loro rapida deteriorabilità e lo scarso rendimento, ne hanno impedito la diffusione.

La Fig. 415-(*b*) mostra una di queste **termopile**, che può fornire corrente a 2,5 *V* e 4 *amp*.

Problema. — *Quale f.e.m. si ottiene con una differenza di temperatura di 50° tra le due serie di saldature di una pila termoelettrica, formata di 64 coppie bismuto-antimonio?*

Soluzione. — Dalla Tabella del § 290 si ricava, che la *f.e.m.* che si genera in una coppia bismuto-antimonio per la differenza di temperatura di 1° *C*, è di 117 μV; quindi per 50° *C* e con 64 coppie, si otterrà la *f.e.m.*:

$$e = (117 \times 50 \times 64)\,\mu V. = 374400\,\mu V. = \mathbf{0{,}37}\ V \text{ circa.}$$

292. **Effetto Peltier.** — È l'inverso del fenomeno termoelettrico. Cioè, se in un circuito di due metalli diversi si manda una corrente elettrica dall'esterno, nella congiuntura dei due metalli si ottiene o un riscaldamento o un raffreddamento, secondo il senso della corrente.

Problema da risolvere.

Quante coppie pachfong-ferro bisogna unire in serie, per ottenere la *f.e.m.* di 1,5 *V*, con la differenza di temperatura di 300° *C*?

Elettromagnetismo.

293. **Campo magnetico della corrente elettrica.** — Sia *C C′* un filo di rame rettilineo, infilato perpendicolarmente in un cartoncino, (Fig. 416). Mettiamo le due estremità di *C C′* in comunicazione coi poli di una potente pila, in modo che nel filo passi una corrente di forte intensità (circa 15 *amp.*); spargiamo sul cartoncino un po' di limatura di ferro e facilitiamone l'orientamento, mediante qualche leggero colpo con le punte delle dita sul cartoncino: vedremo che *la limatura si dispone secondo tanti circoli concentrici*, aventi il centro nell'intersezione del filo col cartoncino. Siccome la limatura non si orienta che sotto l'azione di un campo magnetico, e l'esperienza avviene qualunque sia il punto in cui il cartoncino taglia il

filo, concluderemo che: *Un filo conduttore percorso dalla corrente elettrica genera un campo magnetico, le cui linee di forza sono circonferenze che abbracciano il conduttore, col centro su di esso ed in piani perpendicolari ad esso.*

294. **Esperienze di Oersted.** — Si può provare direttamente l'esistenza di tale campo, anche esaminando l'azione della corrente elettrica sull'ago magnetico. Questa azione fu scoperta da Oersted [1] nel 1819, e dimostrata con le seguenti esperienze:

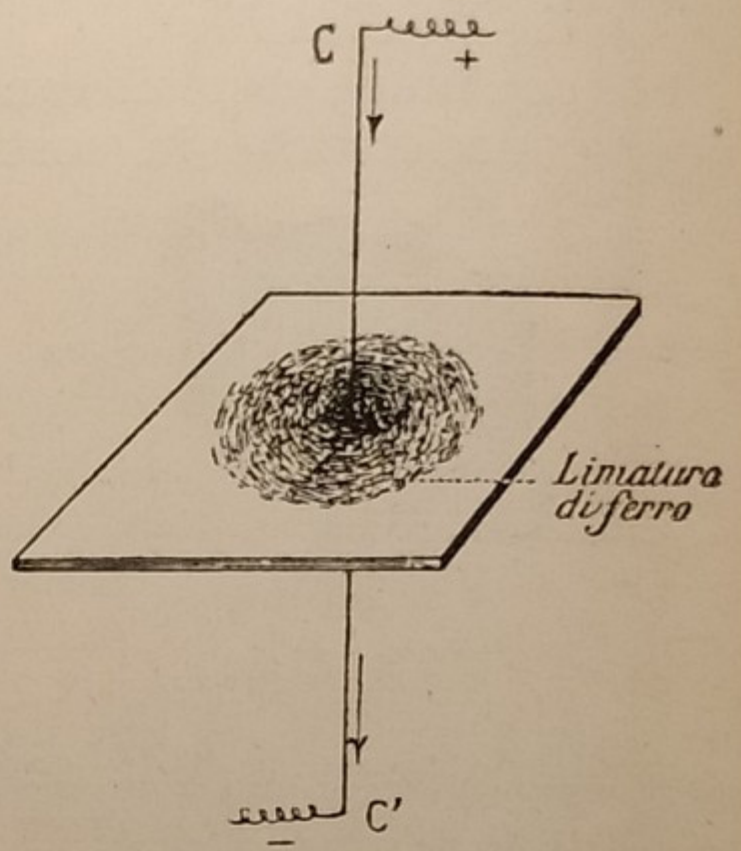


Fig. 416.

Si disponga un filo conduttore AB parallelamente ad un ago magnetico (Fig. 417); si mettano i capi del filo in comunicazione coi poli di una forte pila; non appena in AB passa la corrente elettrica, si vede l'ago girare sul suo perno e deviare rispetto al filo di un certo angolo. Il senso della deviazione avviene secondo la seguente **regola di Ampère** [2]:

Il polo Nord dell'ago si porta alla sinistra della corrente personificata.

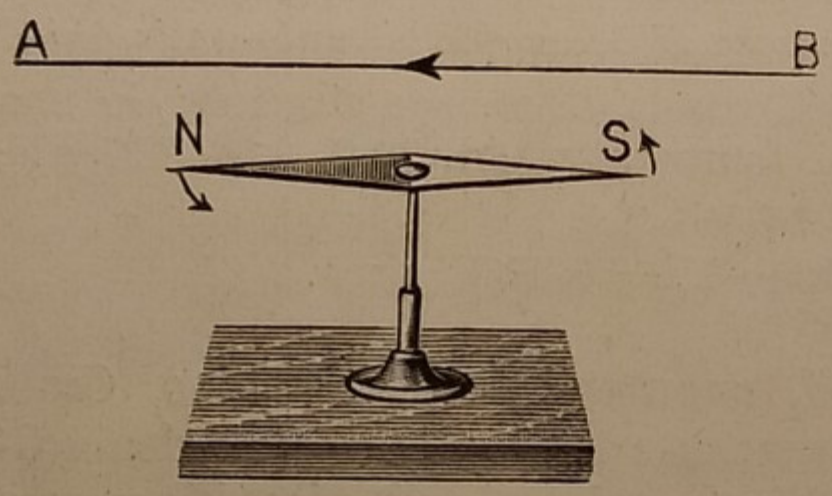


Fig. 417.

Cioè: immaginiamo una persona distesa sul filo, *rivolta verso l'ago*, disposta in modo che la corrente venga dalla parte dei piedi ed esca dalla parte della testa; questa persona vedrà deviare *il polo Nord dell'ago verso la sua sinistra*, (Fig. 418).

Più pratica è la seguente **regola della mano destra**: Si disponga sul filo la mano *destra* (Fig. 419), in modo che il palmo sia rivolto verso l'ago e la corrente venga dalla parte del polso ed esca dalla parte delle dita; cioè l'indice della mano indica il senso della corrente: allora *il polo Nord dell'ago devia verso il pollice.*

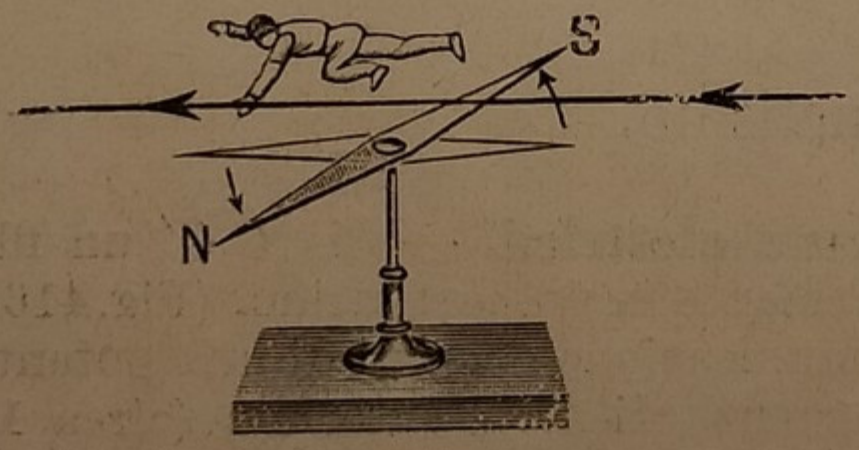


Fig. 418.

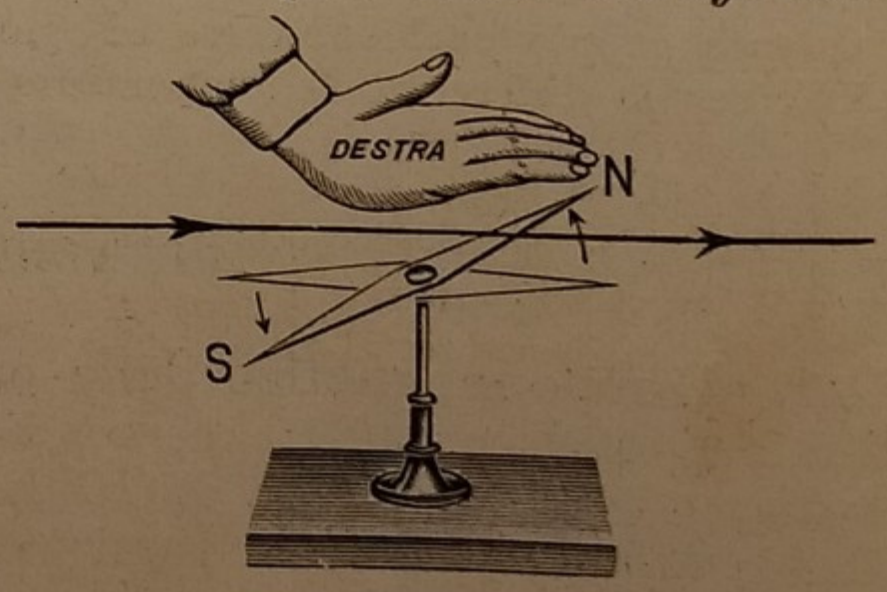


Fig. 419.

(1) Oersted Hans Cristian, fisico dell'Univ. di Copenaghen; n. a Rudkjöbing nel 1777, m. a Copenaghen nel 1851.

(2) Ampère Andrè-Marie, grande fisico e matematico francese; n. a Lione nel 1775, m. a Marsiglia nel 1836.

Applicando questa regola nei varî casi, è facile dedurre che:

1. Se lo stesso filo anzichè sopra si dispone *sotto* l'ago, il senso della deviazione s'inverte.

2. Invertendo il senso della corrente, s'inverte il senso della deviazione dell'ago.

3. Se il medesimo filò si piega in due tratti vicini, come in Fig. 420, le azioni dei due tratti sono opposte e si elidono, e l'ago non devia.

4. Se invece i due tratti si dispongono l'uno *sopra* e l'altro *sotto* all'ago, come è indicato nella Fig. 421, le due azioni si sommano.

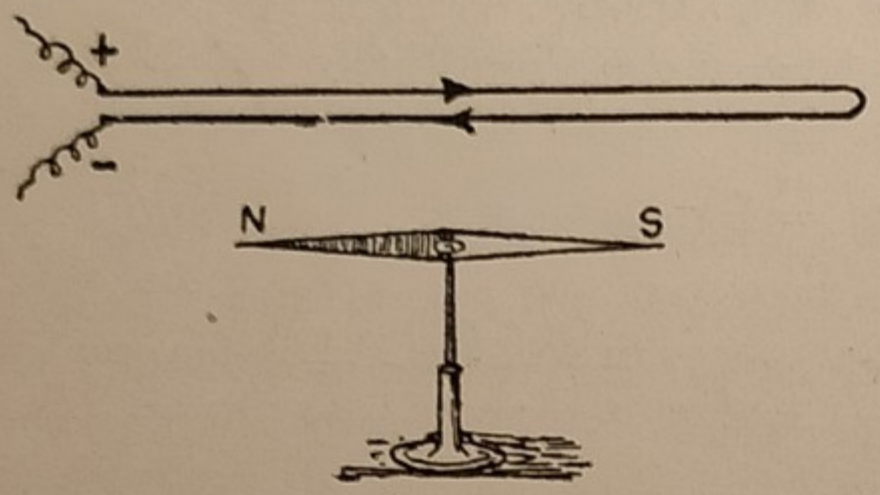


Fig. 420.

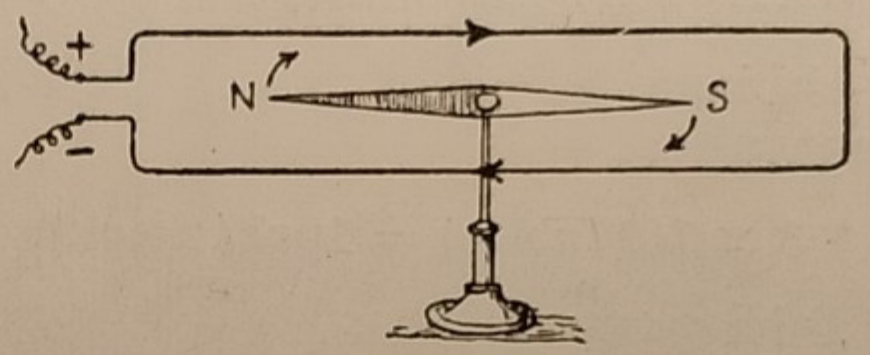


Fig. 421.

295. **Moltiplicatore.** — In base all'ultimo caso, se invece di far girare una volta sola il filo attorno all'ago, lo si fa girare molte volte, l'azione della corrente sull'ago viene aumentata proporzionalmente al numero dei giri; e sarà sufficiente una corrente debole per far deviare l'ago.

Si ottiene così un **moltiplicatore,** che è un telaio attorno a cui è avvolto in molte spire un filo di rame, fasciato per tutta la sua lunghezza con uno strato di cotone o di seta, perchè sia isolato; nell'interno del telaio è posto un ago calamitato *NS*, (Fig. 422). Questo devia, non appena nel filo si lancia una corrente, anche di piccola intensità.

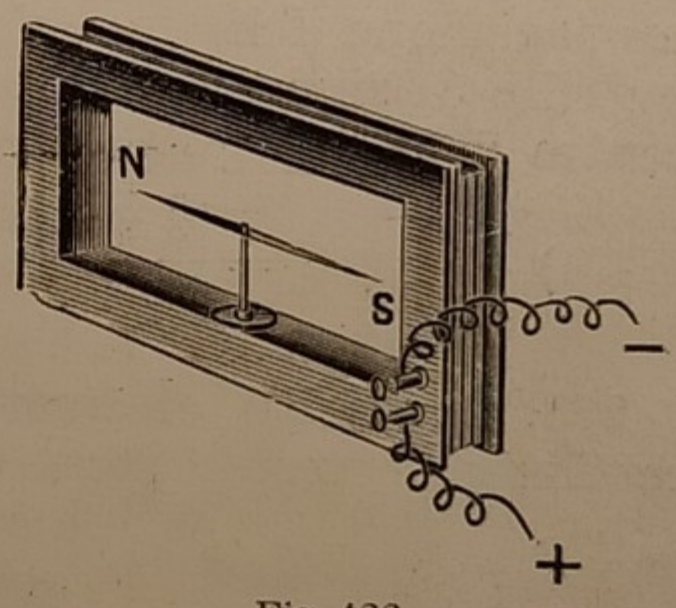


Fig. 422.

296. **Legge elementare di Laplace.** — L'azione esercitata dalla corrente su un polo magnetico è governata dalla seguente **legge di Laplace** [1], dedotta da altra di *Biot* e *Savart*:

L'aione F *di un elemento* s *di corrente, su un polo magnetico* m *posto alla distanza* r *dalla corrente, è proporzionale: direttamente all'intensità* m *del polo, all'intensità* i *della corrente ed alla lunghezza* s *dell'elemento considerato; inversamente al quadrato della distanza* r *fra il polo e la corrente.* Cioè:

$$1) \qquad F = k \frac{m\, i\, s}{r^2} .$$

Se la corrente percorre un circuito circolare di raggio r, la sua lunghezza s è uguale a $2\pi r$, e la 1) diventa:

$$2) \qquad F = k \frac{2\, \pi\, m\, i}{r} .$$

---

(1) Laplace Pierre; n. a Beaumont nel 1749; m. a Parigi nel 1827.

297. **Unità elettromagnetica assoluta di corrente.** — Scegliamo la unità di corrente in modo che sia $k = 1$; la 2) si semplifica così:

$$3) \qquad F = \frac{2\pi m i}{r}.$$

Cioè stabiliamo che sia $i = 1$ allorchè $m = 1$, $r = 1$, ed $F = 2\pi$; ossia: *l'unità assoluta di corrente è quella che agendo su un circolo di raggio 1 cm. esercita sull'unità di magnetismo posta al suo centro, l'azione di 2π dine.*

Quest'unità essendo derivata da un fenomeno elettromagnetico, si chiama **unità elettromagnetica** (*u.e.m.*) **assoluta di corrente.** L'unità pratica, cioè l'**ampère** definita al § 246, equivale a 10^{-1} *u.e.m.* assolute.

Ricordiamo che (§ 246): 1 *ampère* $= 3 \times 10^{-9}$ (*u.e.s.*)

Abbiamo ora che: 1 *ampère* $= 10^{-1}$ (*u.e.m.*); quindi confrontando:

$$3 \times 10^{9}\,(u.e.s.) = 10^{-1}\,(u.e.m.), \qquad \text{cioè:} \qquad \frac{(u.e.m.)}{(u.\,e.\,s)} = 3 \times 10^{10}.$$

Si ha pertanto che:

Il rapporto tra l'unità elettromagnetica e quella elettrostatica di intensità di corrente è di: 3×10^{10}. Questo è anche il valore della velocità della luce in cm. al s.; la coincidenza non è casuale, come ha dimostrato Maxwell; e ci permette di supporre, come meglio vedremo in seguito (§ 357), che la propagazione della luce non è che un fenomeno elettromagnetico.

Dalla 3) si ricava che se $m = 1$, F è l'*intensità del campo* H (§ 141) nel centro della spira, che sarà perciò:

$$4) \qquad H = \frac{2\pi i}{r}, \qquad \text{in cui } i \text{ è misurato in } (u.e.m.).$$

298. **Foglietto elettromagnetico.** — Ricordiamo (§ 293) che un filo rettilineo, percorso dalla corrente elettrica, genera un campo magnetico le cui linee di forza sono circoli che circondano il filo, col centro su questo ed in piani perpendicolari ad esso.

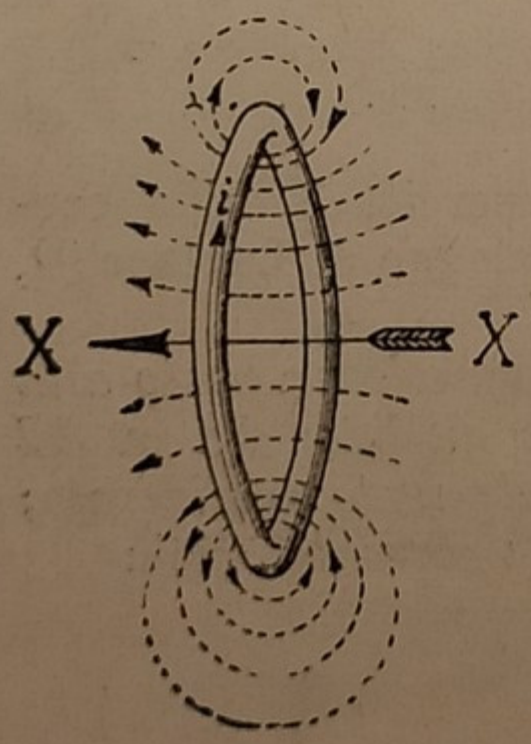


Fig. 423.

Se ora pieghiamo il filo in modo da dargli la forma di un circuito chiuso, per es., di un cerchio (Fig. 423), le linee di forza (che sono le linee punteggiate nella figura) si dispongono in modo che, partendo ciascuna da una faccia della spira circolare, girano attorno al contorno di essa e vanno ad entrare dall'altra faccia. Ora, proprio in tal modo si dispongono le linee di forza in un *foglietto magnetico* (§ 143); quindi:

Un circuito chiuso percorso dalla corrente elettrica equivale ad un foglietto magnetico, avente lo stesso contorno.

Per la verifica sperimentale si prenda una spira metallica, piegata, p. es., a forma circolare, aperta in un punto, e quivi ripiegata come indica la Fig. 424; in modo da stare in bilico sulle punte in due capsule metalliche CC' ripiene di mercurio; queste comunicano, per mezzo delle due bacchette B e B', coi due poli di una forte pila. In questo modo la corrente può circolare per il mercurio

nella spira di metallo, pur consentendo a questa di muoversi e girare su sè stessa.

Facendo passare la corrente nella spira, si vedrà questa girare ed orientarsi in modo che una faccia si rivolge a Nord e l'altra a Sud; cioè *si dispone col suo piano perpendicolare al meridiano magnetico*. Accostando un polo di una calamita ad una delle facce della spira, questa, ad es., si sposterà per l'attrazione che il polo esercita su di essa; ma allora il medesimo polo eserciterà un'azione di repulsione sull'altra faccia. La spira cioè si comporta come una calamita avente i poli sulle due facce; cioè come un foglietto magnetico, come appunto volevamo dimostrare.

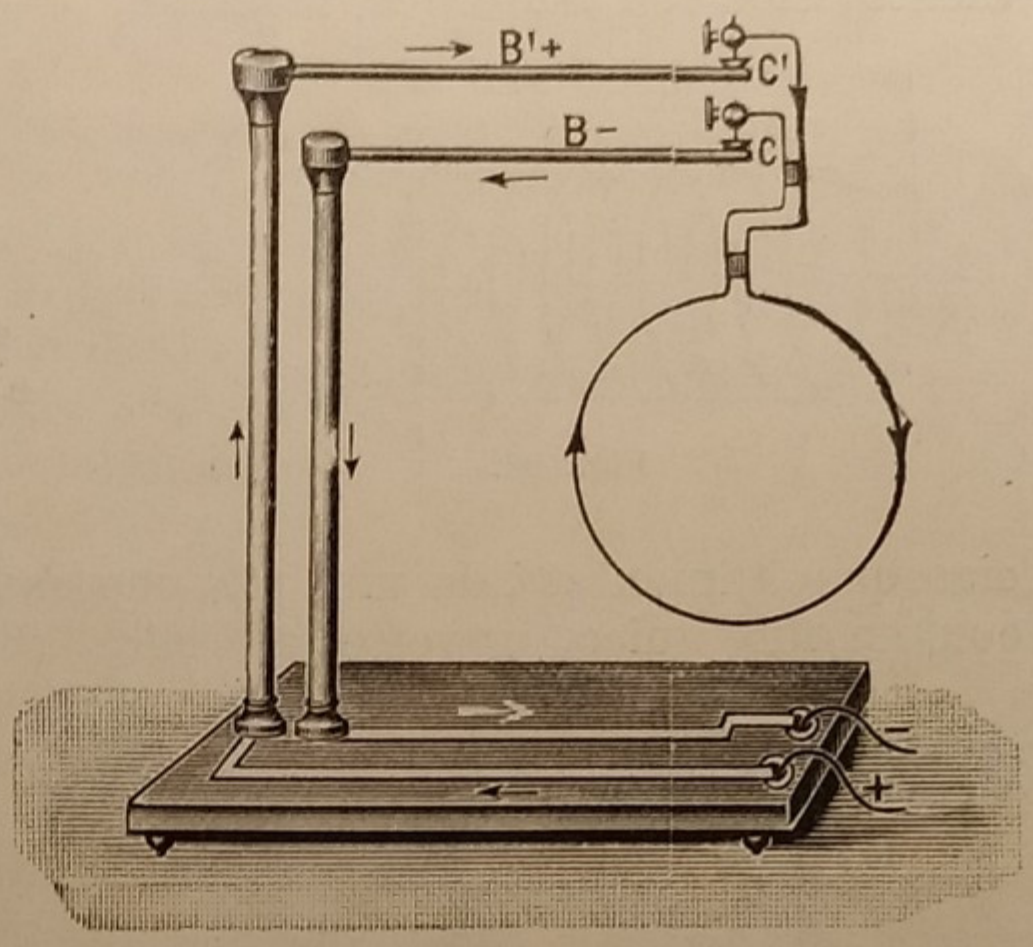


Fig. 424.

299. **Ipotesi sul magnetismo - Il magnetone.** — Lo stretto legame tra la corrente elettrica e la magnetizzazione, dimostrata nel paragrafo precedente, aveva indotto Ampère a supporre che un magnete elementare (§ 143) fosse costituito da una corrente elettrica, che circolasse attorno ad una molecola, magnetizzandola. Anzi, generalizzando, suppose che anche il magnetismo terrestre fosse dovuto a correnti elettriche, che circolassero sulla terra da Est ad Ovest; cioè nel senso del moto apparente del Sole.

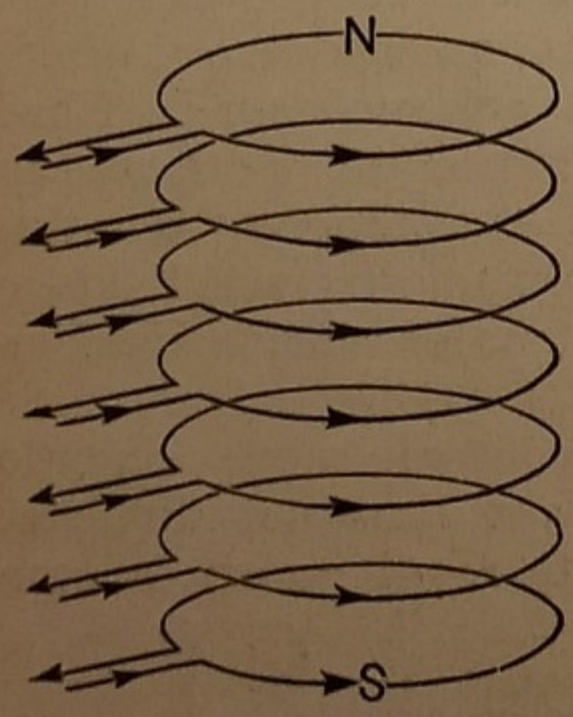


Fig. 425.

Con la scoperta dell'*elettrone*, comprendiamo meglio l'ipotesi di Ampère. Un elettrone che ruota su un'orbita (§ 231) costituisce una corrente elettrica elementare; questa perciò, come la spira del § 298, genera un campo magnetico, nella direzione dell'asse dell'orbita dell'elettrone. Sappiamo (§ 231) che le orbite dell'elettrone possono essere parecchie, di raggio diverso; se l'orbita è quella più vicina al nucleo, cioè la più piccola della serie, il magnete elementare che ne risulta è il più piccolo che può esistere; lo chiamiamo **il magnetone.**

300. **Solenoide elettromagnetico.** — Ora disponiamo parecchie spire circolari, coi loro piani paralleli, e siano percorse da correnti concordanti, come indica la Fig. 425. Le facce di queste spire formeranno dei poli magnetici, alternativamente Nord e Sud; in modo che risulteranno affacciati poli opposti di spire consecutive, che si elidono. Rimangono le azioni magnetiche delle facce estreme, che formano l'una un polo Nord e l'altra un polo Sud. Tutto il sistema cioè equivale ad una calamita avente

i poli sulle facce estreme; esso si chiama **cilindro o solenoide elettromagnetico.**

Sarebbe troppo incomodo formare un solenoide come abbiamo ora indicato; cioè con tante spire staccate,

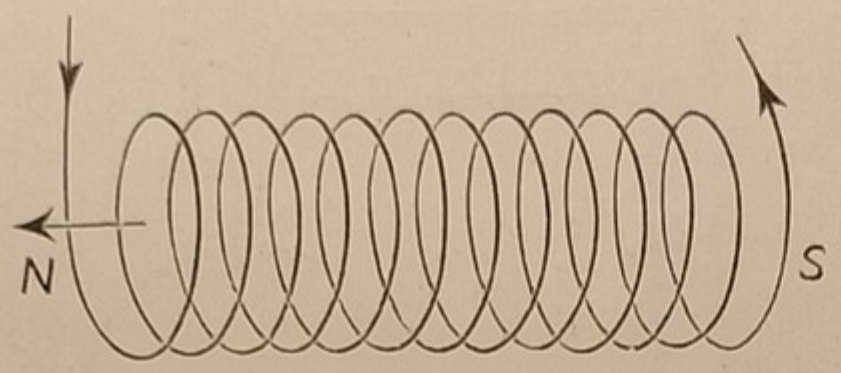


Fig. 426.

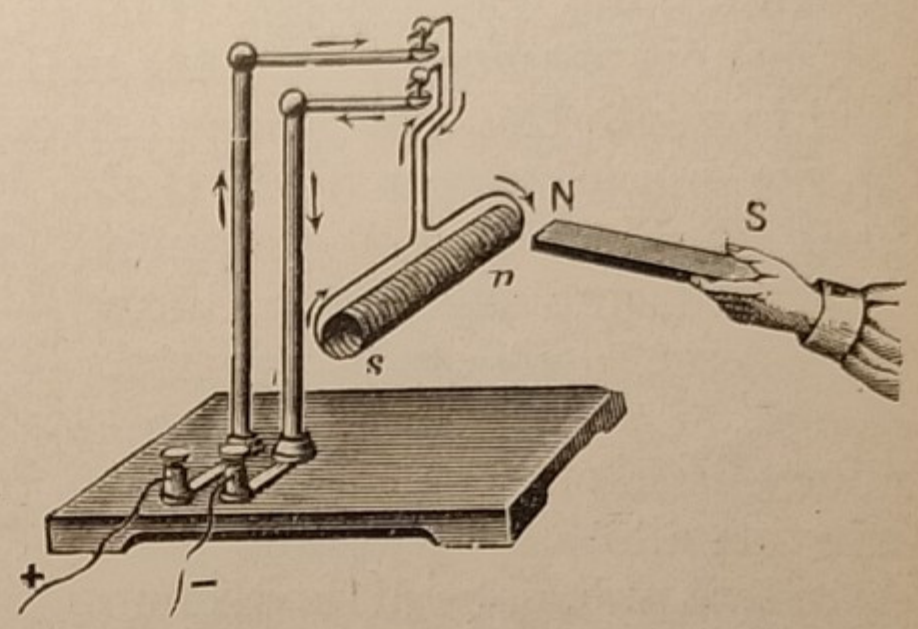


Fig. 427.

ciascuna alimentata da una pila separata. Praticamente lo si può formare con un filo unico, avvolto ad elica (Fig. 426); ciascuna spira dell'elica funziona come se fosse contenuta in un piano, cioè come una spira circolare; ma basta ora una sola pila, coi poli collegati agli estremi dell'elica, perchè questa funzioni come il solenoide della Fig. 425.

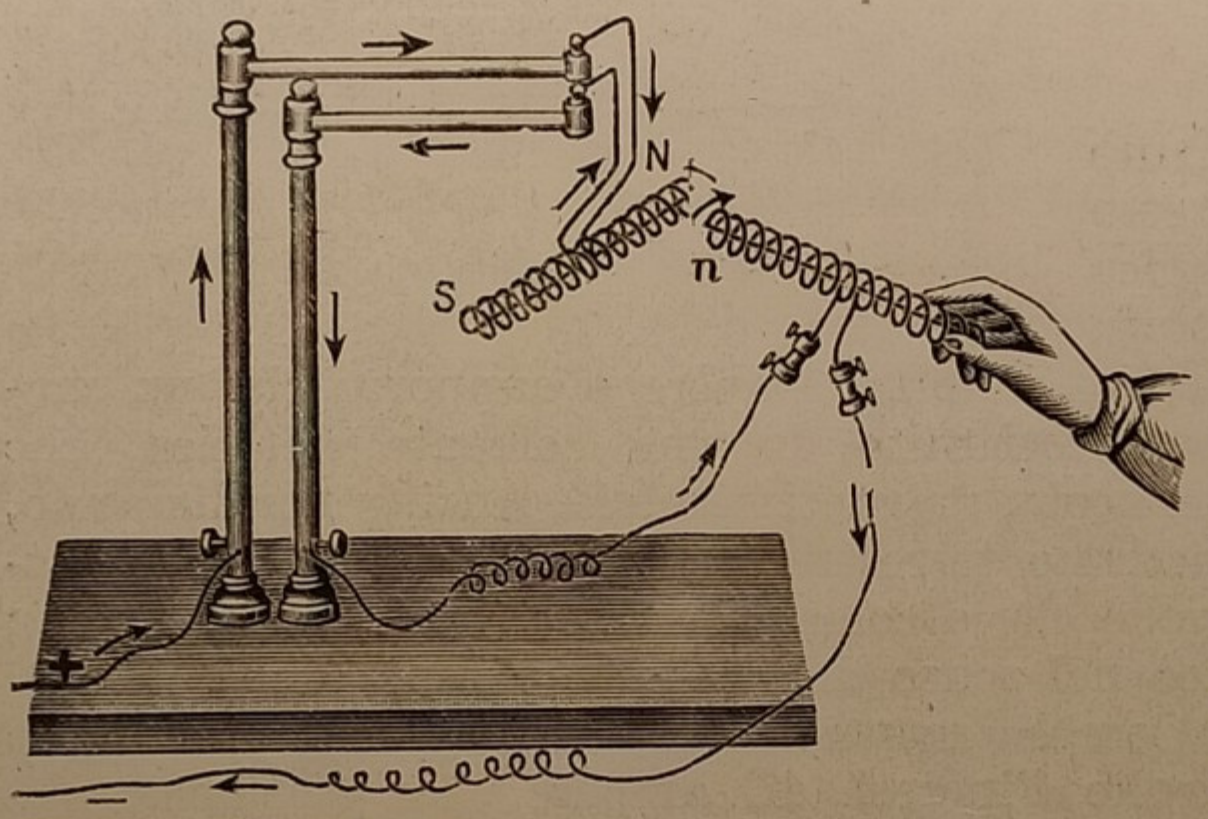


Fig. 428.

L'esperienza conferma tali risultati; appendendo il solenoide al sostegno della Fig. 424, al passaggio della corrente esso si orienterà col suo asse da Nord a Sud, come se fosse un ago magnetico; risentirà sulle sue estremità l'azione di un polo magnetico (Fig. 427), e potrà risentire analogamente l'azione di un altro solenoide (Fig. 428).

La direzione del campo in un solenoide è quella del suo asse; ponendo infatti nell'interno di un solenoide un cartoncino con limatura di ferro, questa si dispone come indica la Fig. 429. L'intensità H di questo campo sarà naturalmente proporzionale all'intensità i della corrente ed al numero delle spire contenute per ogni centimetro della lunghezza l del solenoide (distanza fra le facce estreme); cioè:

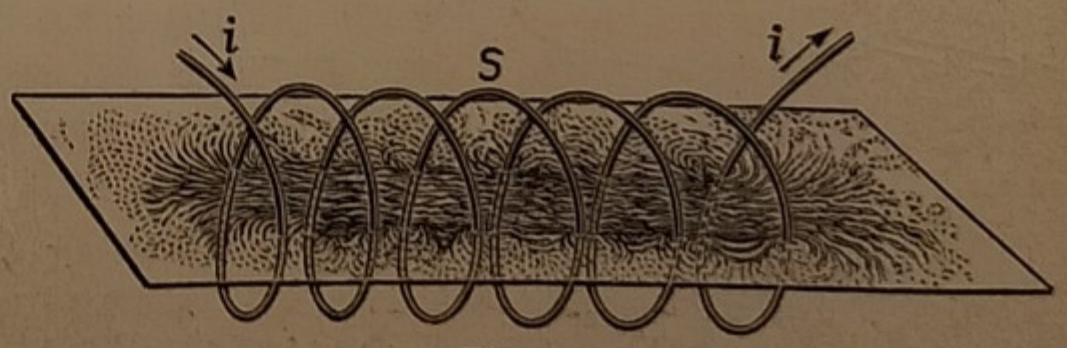


Fig. 429.

$$5) \qquad H = 1{,}25 \frac{n\,i}{l},$$

nella quale H è misurata in *gauss* (§ 140) ed i in *ampère*; n è il numero

totale delle spire contenute nel solenoide; il prodotto ni si chiama anche gli **ampèr-spire.**

Problema. — *Qual'è l'intensità del campo generato da un solenoide della lunghezza di cm. 15, formato da 60 spire, percorso dalla corrente di 12 amp?*

Soluzione. — Dovremo porre nella 5): $n = 60$, $i = 12$, $l = 15$, e sarà:

$$H = 1{,}25 \frac{60 \times 12}{15} \textit{ gauss} = \textbf{60 gauss.}$$

301. **Elettrocalamite.** — Ma l'azione magnetica di un tal solenoide è debolissima; esso non è capace di attirare la limatura o un pezzo di ferro, come farebbe una calamita.

Introduciamo ora nel suo interno un bastoncino di ferro dolce, che chiamiamo più comunemente **un nucleo** (Fig. 430); questo si magnetizza per induzione e per la sua *permeabilità* è attraversato da un numero di linee di forza assai maggiore (§ 145); dagli estremi del nucleo esce così un flusso assai più intenso che per lo stesso spazio privo di ferro; cioè il nucleo diventa una forte calamita. Si chiama un'**elettrocalamita,** ed è una *calamita temporanea*; cioè persiste finchè nel solenoide passa la corrente; interrompendo questa il nucleo si smagnetizza.

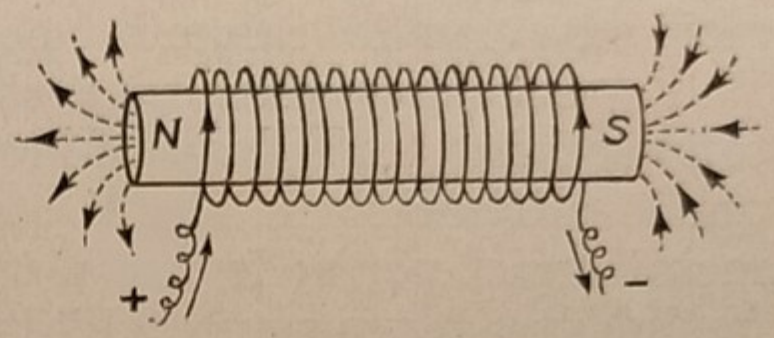


Fig. 430.

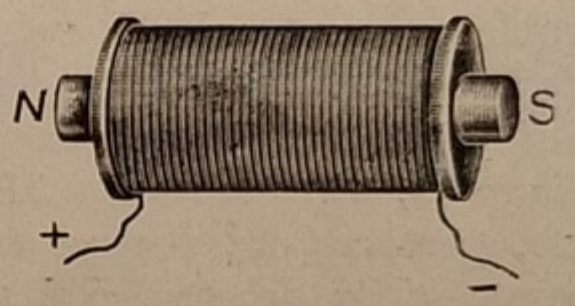


Fig. 431.

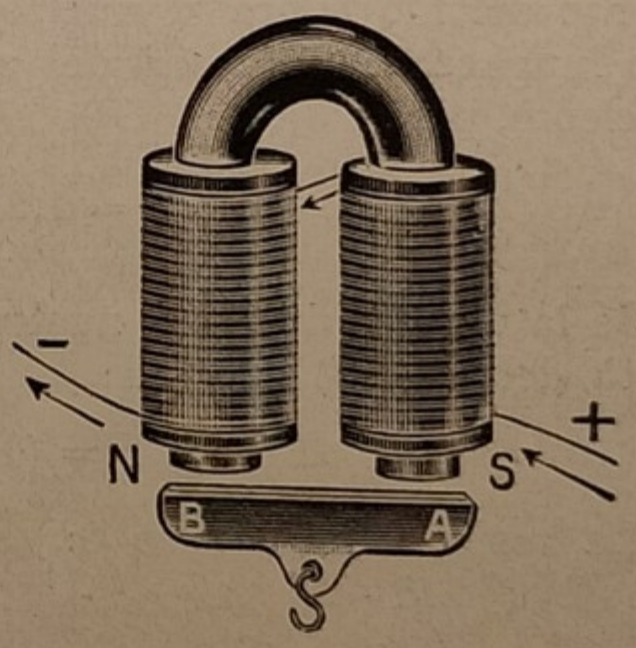


Fig. 432.

L'intensità della magnetizzazione è ancora (fra certi limiti) proporzionale al numero delle spire del solenoide ed all'intensità della corrente, cioè agli *ampère-spire.* Conviene pertanto invece di un solenoide adoperare un *rocchetto*, formato con molti strati e quindi molte spire di filo di rame, fasciato di seta o di cotone; entro il rocchetto vi è il nucleo di ferro. L'elettrocalamita acquista così la forma della Fig. 431 e si chiama **elettrocalamita rettilinea.**

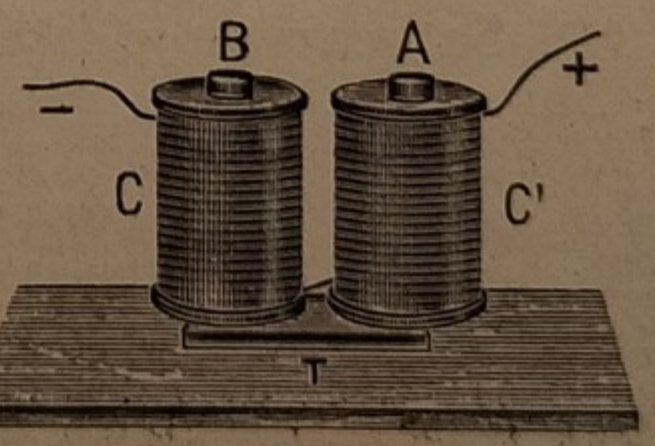


Fig. 433.

Allo scopo di avere i due poli vicini, si può piegare il nucleo a forma di U, o come meglio si dice **a ferro di cavallo**; in tal caso si abolisce la porzione del filo che dovrebbe circondare la parte ricurva del nucleo e l'avvolgimento è limitato a due rocchetti che circondano le due branche diritte del nucleo, (Fig. 432). Il filo nei due rocchetti deve essere avvolto in senso contrario; in guisa cioè che se si raddrizzasse il nucleo, l'avvolgimento nei due rocchetti risulterebbe nello stesso senso, cioè un rocchetto sarebbe il prolungamento dell'altro; così dev'essere perchè alle estremità del nucleo si formino poli opposti.

Per comodità di costruzione si usa frequentemente l'elettrocalamita **a doppia squadra** (Fig. 433), in cui la parte ricurva del nucleo è sostituita da una sbarretta diritta T di ferro dolce, su cui sono avvitate o ribadite le due branche cilindriche del nucleo, attorno alle quali sono i rocchetti col filo [1].

Con le elettrocalamite si ottengono portate (§ 149) grandissime, assai maggiori che con le calamite permanenti. Ve ne sono di quelle che portano quintali e perfino tonnellate di ferro; ad es., quelle adoperate in alcuni stabilimenti metallurgici per sollevare e trasportare facilmente da un punto all'altro oggetti di ferro, (Fig. 434).

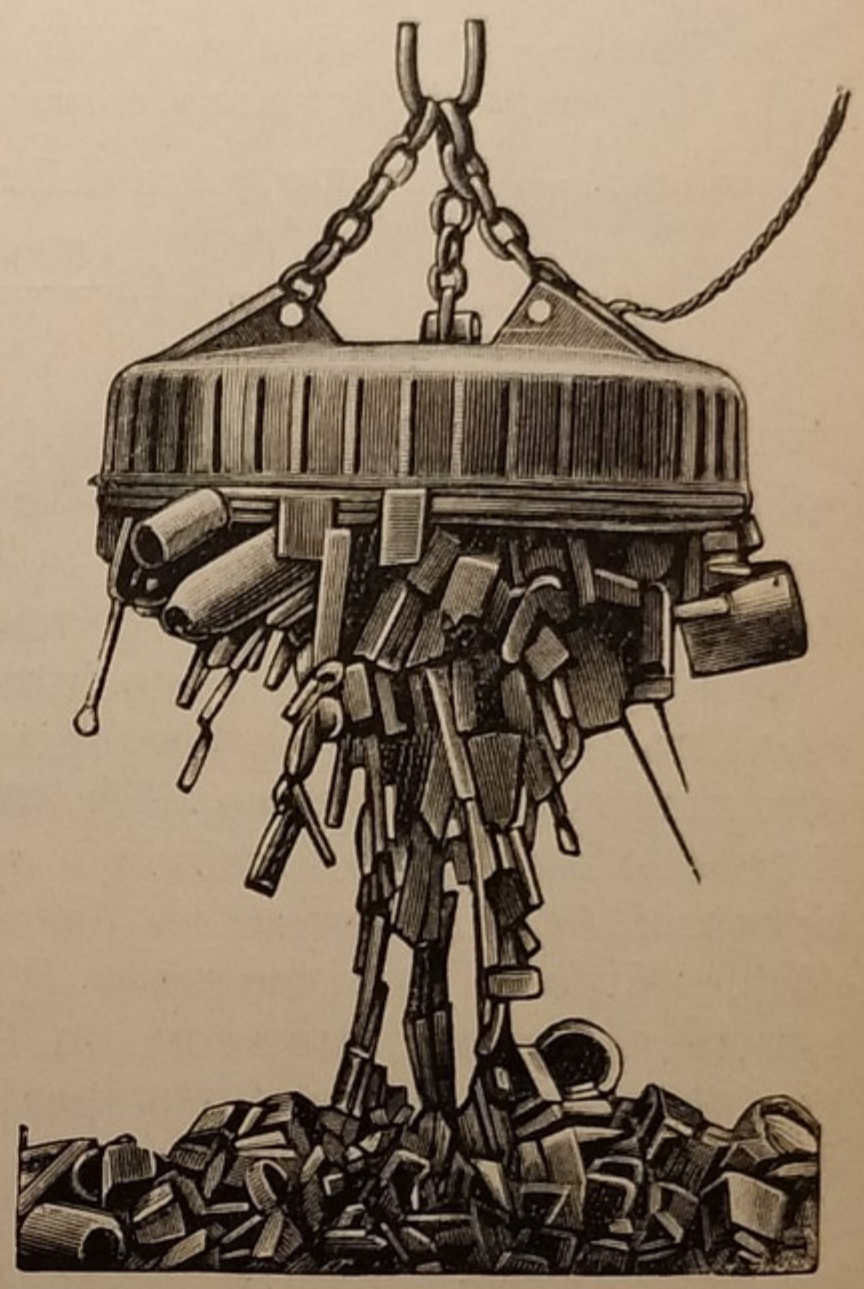


Fig. 434.

Problema. — *Qual'è il valore del flusso di un'elettrocalamita rettilinea, formata da un nucleo di ferro di cm.15 di lunghezza e mm.20 di diametro, circondato da 250 spire di rame isolato, percorse dalla corrente di 5 amp, se la permeabilità del nucleo è $\mu = 1500$?*

Soluzione. — Supponendo che l'avvolgimento del filo copra il nucleo per tutta la sua lunghezza, l'intensità del campo senza il nucleo è, per la 5):

$$H = 1{,}25 \frac{250 \times 5}{15} \; gauss = 104{,}2 \; gauss.$$

Se la permeabilità del nucleo è: $\mu = 1500$, l'intensità del campo (vicino all'estremità del nucleo) diventa:

$$H' = \mu H = (1500 \times 104{,}2) \; gauss = 156300 \; gauss.$$

La sezione del nucleo è: $s = cm^2 \, (3{,}14 \times 1^2) = cm^2 \, 3{,}14$; quindi il flusso cercato è, (§ 141 - 2):

$$\Phi = H's = (156300 \times 3{,}14) \; maxwell = \mathbf{490782 \; maxwell.}$$

302. **Saturazione e isteresi magnetica - Curva di magnetizzazione.** — La proporzionalità tra gli ampèr-spire e l'intensità della magnetizzazione nell'elettrocalamita avviene solo al principio della magnetizzazione del nucleo, e quindi per piccoli valori di questa. Aumentando l'intensità della corrente, la magnetizzazione del nucleo cresce sempre più lentamente; finchè raggiunge un valore massimo, che per un dato nucleo non si può oltrepassare. Si dice che si raggiunge la **saturazione magnetica.**

Ciò è evidente; altrimenti si potrebbe pensare di costruire un'elettrocalamita capace di portare anche dei quintali, con un nucleo grande come una matita, circondato da un grosso rocchetto di migliaia di spire. Invece,

---

(1) Si noti bene che nell'elettrocalamita la corrente deve circolare nel filo dei rocchetti e non nel ferro.

con un nucleo così piccolo non si potrà sorpassare quell'intensità di magnetizzazione che comporta la saturazione magnetica di esso; per aumentare la portata di un'elettrocalamita occorre aumentare bensì gli ampèr-spire, ma contemporaneamente aumentare la sezione del nucleo.

Lanciando la corrente nei rocchetti di un'elettrocalamita, il nucleo non si magnetizza nel medesimo istante; ma un momento più tardi. Si ricordi l'ipotesi fatta al § 144, sulla magnetizzazione del ferro; occorre dar tempo alle molecole di muoversi e di orientarsi, perchè il nucleo si magnetizzi. Così pure, interrompendo la corrente le molecole si disorientano in un certo tempo, ed il nucleo si smagnetizza con qualche istante di ritardo.

Questo ritardo del ferro a magnetizzarsi e smagnetizzarsi si chiama **isteresi magnetica.** Essa dipende dalla qualità del ferro; è minima nel ferro dolce, ed è massima nell'acciaio.

Poichè non è possibile in pratica avere ferro perfettamente puro, il nucleo non si smagnetizza mai completamente; ma al cessare della corrente conserva un debole **magnetismo residuo.**

Rappresentiamo graficamente la variazione della intensità della magnetizzazione del nucleo, col variare dell'intensità della corrente; prendiamo perciò un sistema di assi cartesiani e riportiamo secondo le ascisse i valori della intensità della corrente e secondo le ordinate i valori corrispondenti della intensità della magnetizzazione. Facciamo variare l'intensità della corrente dal valore, ad es., di 6 amp. in un senso (−6 amp.) al valore di 6 amp. in senso opposto (+6 amp.), e viceversa.

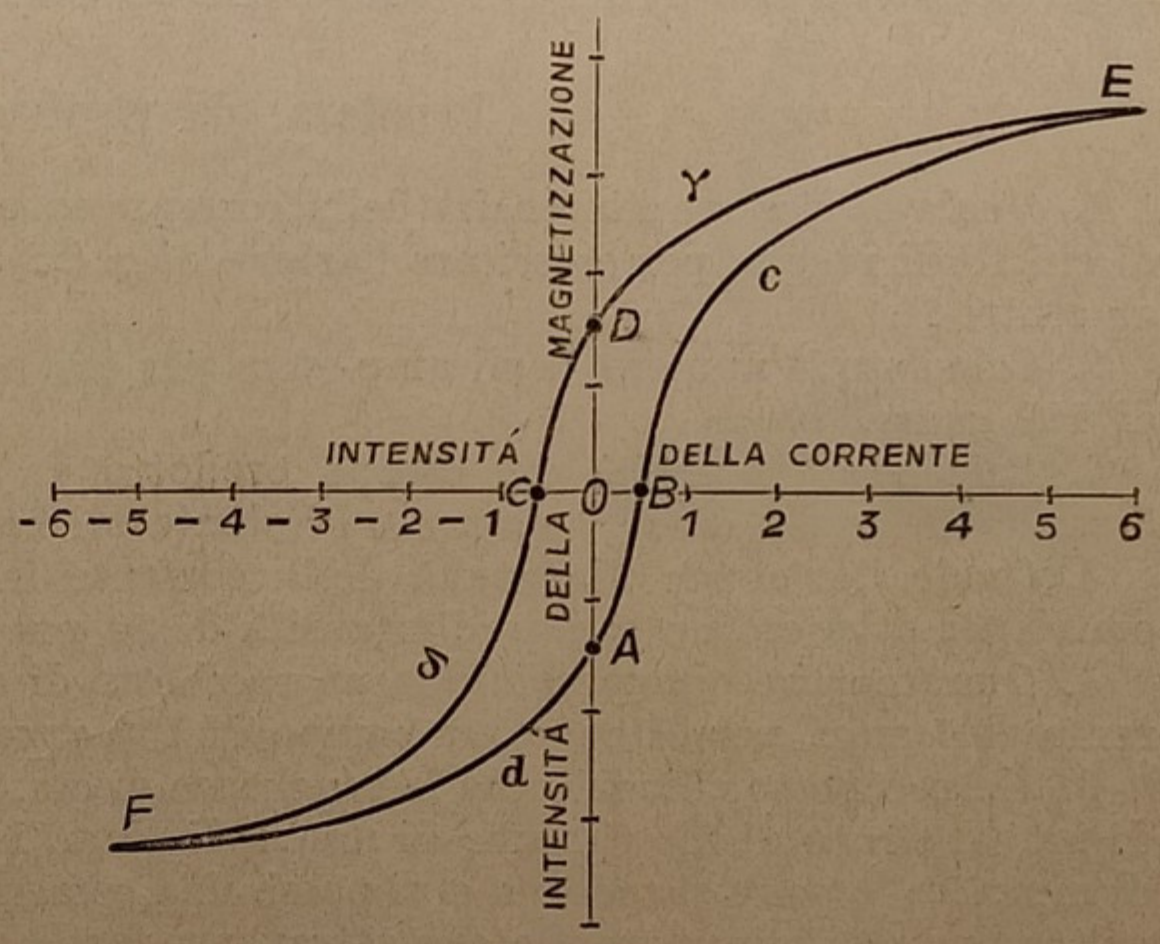


Fig. 435.

Nella prima fase (da −6 a +6 amp.) l'intensità della magnetizzazione, da un certo valore negativo (cioè in modo che su una delle estremità del nucleo si formi, ad es., un polo Sud) decresce gradatamente (Fig. 435); ma non si annulla allorchè l'intensità della corrente ha raggiunto il valore zero; bensì qualche tempo più tardi (nel punto *B* del diagramma), allorchè tale intensità è di 0,5 amp. Indi la magnetizzazione cambia di segno (cioè all'estremità del nucleo in cui prima era un polo Sud, ora si forma un polo Nord), ed aumenta dapprima rapidamente, poi più lentamente. Questa variazione dell'intensità della magnetizzazione è rappresentata nel diagramma della Fig. 435 dal tratto *F d c E* della **curva di magnetizzazione**; questa sale sempre più lentamente, finchè si confonderebbe con un tratto rettilineo parallelo all'asse delle ascisse. Cioè, da un certo valore dell'intensità della corrente in poi, l'intensità della magnetizzazione, raggiunto un valore massimo, non aumenta più; ciò indica che si è raggiunta la *saturazione magnetica*.

Variando l'intensità della corrente in senso inverso, da + 6 a − 6 amp., si ottiene l'altro ramo $E\ \gamma\ \delta\ F$ della curva di magnetizzazione; nel quale si osserva ancora, che l'intensità della magnetizzazione si annulla non per il valore zero dell'intensità della corrente, ma con un certo ritardo, per il valore di circa − 0,6 amp. Il valore OD dell'intensità della magnetizzazione, indica il *magnetismo residuo;* esso è tanto minore, quanto più il ferro è puro, e il diagramma è tanto più schiacciato, quanto più il ferro è dolce. Con ferro perfettamente puro i due tratti della curva coinciderebbero, e la curva risultante passerebbe per l'origine O; in tal caso sarebbero nulli tanto il magnetismo residuo quanto l'isteresi.

Questa isteresi indica una certa difficoltà, una certa resistenza all'orientamento dei magneti elementari (§ 143) di cui è formato il nucleo; e quindi un dispendio di energia per la magnetizzazione e la smagnetizzazione del nucleo; essa si trasforma in calore. Allorchè il nucleo è assoggettato a rapide e molteplici variazioni di magnetizzazione, il che avviene se nei rocchetti dell'elettrocalamita circola *corrente alternata*, la quantità di calore sviluppato nel nucleo è rilevante, ed esso può riscaldarsi notevolmente e raggiungere anche temperature elevate. Ciò è applicato talvolta nella tecnica, per generare calore con la corrente elettrica (alternata).

Problemi da risolvere.

1. Quale dev'essere l'intensità della corrente in un rocchetto circolare di 20 spire, di cm. 10 di raggio, per esercitare l'azione di g. 0,2 su un polo di intensità 50, posto al centro?

2. Calcolare il numero degli amp-spire per cm. occorrenti per ottenere un campo di 100 *gauss*.

3. Calcolare l'intensità del campo prodotto da un rocchetto lungo cm. 20, con 5 strati di filo del diam. (compreso l'isolante) di mm. 0,8, con la corrente di 4 amp.

4. Quale dev'essere l'intensità della corrente in un solenoide di 70 spire, lungo cm. 9, per ottenere un campo d'intensità di 80 *gauss*?

5. Quante spire occorreranno in un rocchetto di cm. 20 di lunghezza, con una corrente di 7 amp, per ottenere un campo di 150 *gauss*?

6. Un rocchetto cilindrico ha la lunghezza di cm. 50 e il diam. di cm. 10; è formato di un sol strato di filo di rame di mm. 1 di diam. isolato con cotone per lo spessore di mm. 0,2; le spire si toccano e vi passa una corrente di 3 amp. Calcolare l'intensità del campo ed il flusso totale che attraversa il rocchetto.

7. Quale dev'essere il diametro del nucleo di un'elettrocalamita rettilinea, la cui lunghezza è di cm. 12, per ottenere un flusso totale di 200000 *maxwell*, con 200 spire e 4 amp, se la permeabilità del ferro impiegato è di 1200 unità?

Galvanometri - Amperometri - Voltmetri.

303. **Bussola delle tangenti.** — L'azione fra corrente e magnete dipendendo dall'intensità della corrente, può servire per farne la misura. Gli apparecchi adoperati per questo scopo si chiamano i **galvanometri,** che derivano dalla **bussola delle tangenti.**

Questa è formata da un telaio circolare R (Fig. 436) su cui è avvolto un filo di rame isolato, i cui capi comunicano con due *serrafili* $s - s'$. Le facce del telaio possono disporsi verticalmente, per mezzo di un treppiedi a viti

calanti, con l'aiuto di una livella L; può ruotare attorno ad un asse verticale, in modo da orientarlo nel meridiano magnetico. Al centro del telaio è sospeso un ago calamitato $N-S$, così piccolo da potersi considerare come un punto; e munito di un leggero indice I, in modo da leggerne l'angolo di cui ruota, su un cerchio graduato C. Se nel telaio non passa corrente, l'asse magnetico dell'ago è nel meridiano magnetico.

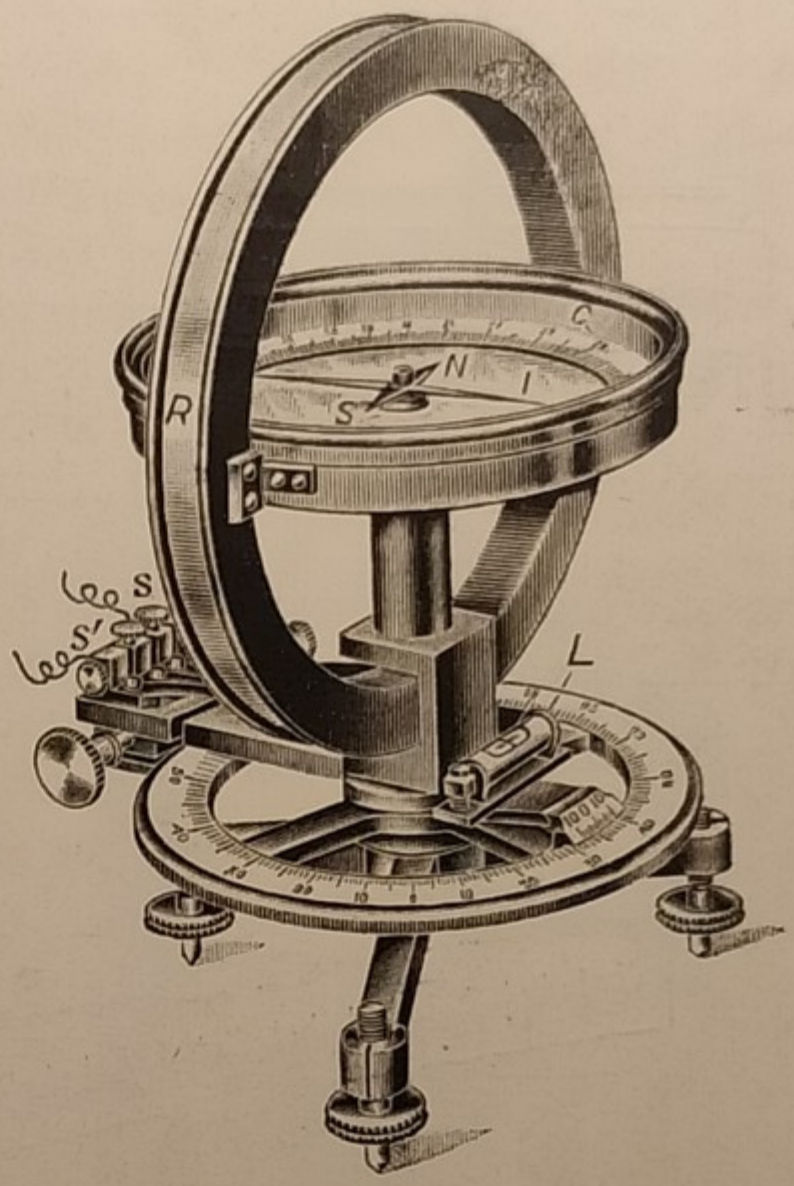


Fig. 436.

Facciamo ora passare nel telaio, per mezzo dei serrafili $s-s'$, la corrente da misurare; l'ago devierà di un angolo α. Si dimostra che *l'intensità della corrente è proporzionale alla tangente dell'angolo di deviazione* α. Cioè:

$$1) \qquad I = K \text{ tang } \alpha.$$

La costante K si chiama il **coefficiente di riduzione** della bussola. Si potrebbe calcolare misurando il raggio r delle spire del telaio, contando il loro numero n e conoscendo il valore del campo magnetico terrestre nel punto in cui è posta la bussola. Ma si preferisce ricavarlo con l'esperienza, inviando nella bussola una corrente d'intensità nota, (dedotta dalla quantità d'argento che si deposita in un voltametro inserito in serie con la bussola, come abbiamo indicato nel § 246 - 9); in modo che nella 1) l'incognita sia il coefficiente K, che così rimane determinato.

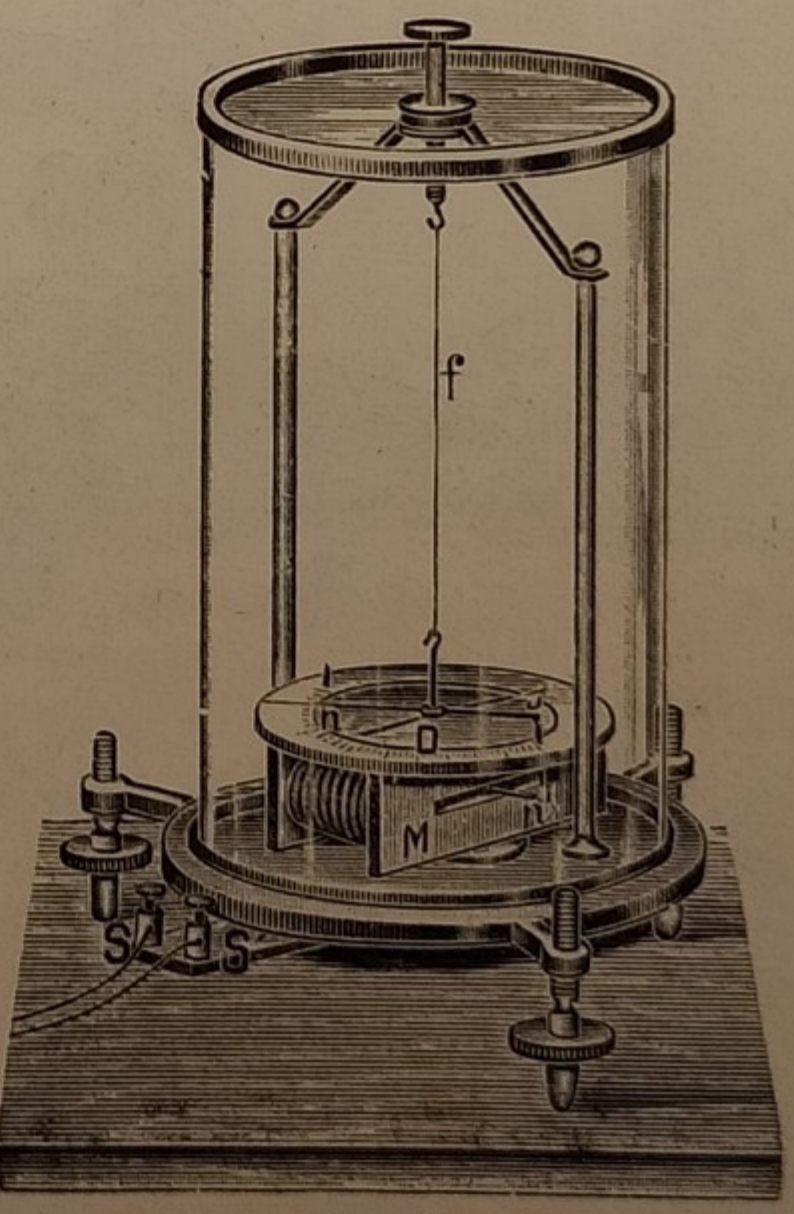


Fig. 437.

304. **Galvanometri.** — Il *galvanometro del Nobili* è uno dei primi costruiti, (nel 1825), ancora oggi qualche volta adoperato per la sua semplicità. Esso è formato da un piccolo e piatto rocchetto moltiplicatore M (§ 295), nel cui filo si manda la corrente da misurare, condottavi per due serrafili SS', (Fig. 437). Dentro al rocchetto è sospeso un ago calamitato n' connesso rigidamente ad un altro ago eguale ns, che rimane sopra al rocchetto, parallelo al primo ma coi poli opposti; cioè all'estremità in cui un ago ha il polo Nord l'altro ha il Sud. Tale sistema di aghi si chiama **astatico,** perchè non risente l'azione magnetica della Terra, e perciò si orienta in qualsiasi direzione; esso è sospeso per mezzo di un filo di bozzolo f. Un cilindro di vetro ricopre tutto l'apparecchio.

Si dispone dapprima il sistema dei due aghi parallelamente alle spire del moltiplicatore; per questo tutto il rocchetto può girare attorno ad un asse centrale verticale. Indi si lancia la corrente: l'ago devia, e se ne legge la deviazione su un disco di rame O graduato, servendosi dell'ago superiore quale indice; da questa deviazione si può dedurre il valore dell'intensità della corrente, (§ 303).

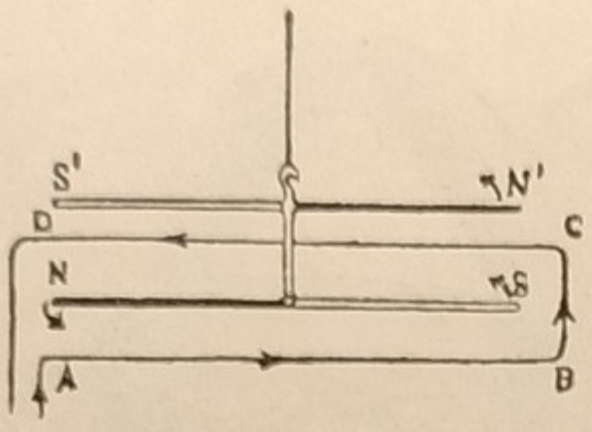


Fig. 438.

Per meglio esaminare l'azione della corrente sul sistema astatico, rappresentiamo in AB-CD una delle spire del moltiplicatore, ed in $S'N'$–NS i due aghi, (Fig. 438). Applicando la regola della mano destra (§ 294), si vede che delle quattro azioni dei due tratti AB e CD sui due aghi, tre sono concordanti; quella di AB su $N'S'$ è discordante, ma si trascura per la maggiore distanza del

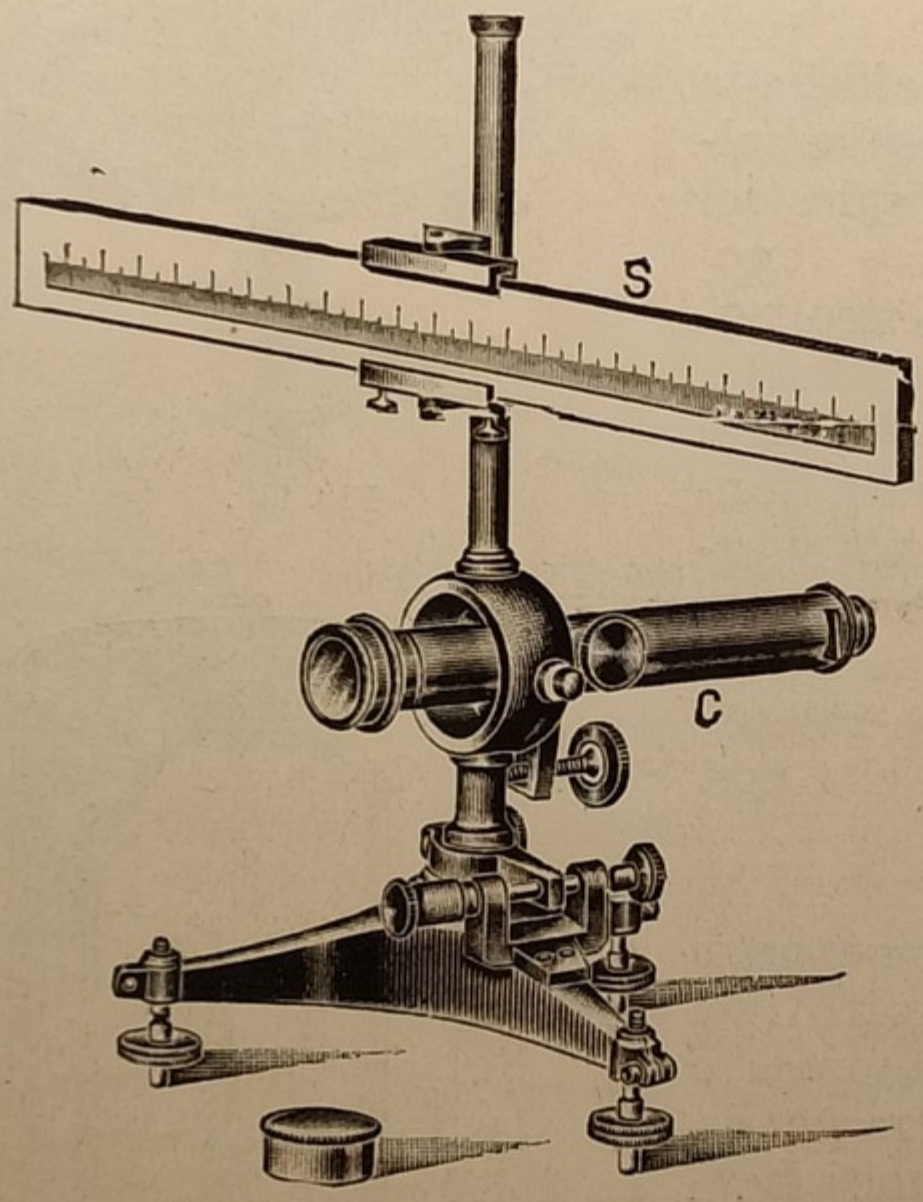


Fig. 439.

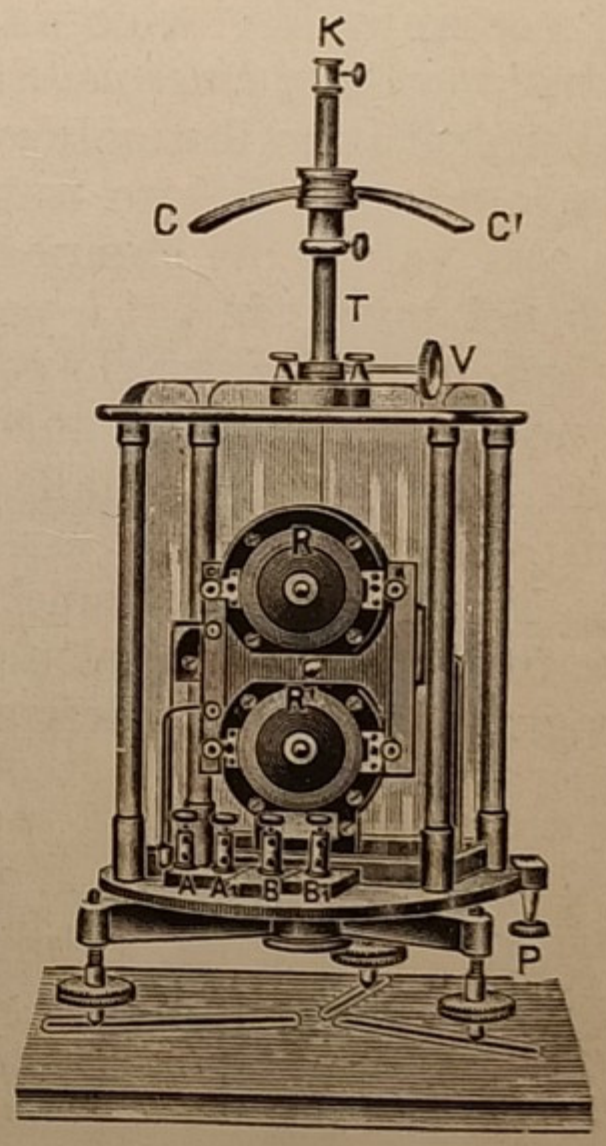


Fig. 440.

filo dall'ago. Ma non è tanto questo il vantaggio offerto dal sistema astatico; bensì quello che la sua sensibilità è molto accresciuta per il fatto che per deviarlo, non occorre vincere l'azione magnetica antagonista della Terra, ma semplicemente la debolissima torsione del filo di bozzolo.

Il galvanometro Nobili può arrivare alla sensibilità di qualche decimillesimo di ampère. Oggi si costruiscono galvanometri assai più sensibili, in cui invece di uno vi sono quattro rocchetti, ed il sistema astatico è diviso in due sistemi di aghi: uno per ogni coppia di rocchetti. La lettura della deviazione si fa con *cannocchiale e scala*: all'ago è fissato un piccolo specchio, che ruota insieme ad esso e se ne calcola l'angolo di rotazione, ponendo di fronte allo specchietto, alla distanza di uno o due metri, una striscia di carta milli-

metrata S, detta la *scala* (Fig. 439). L'immagine di questa nello specchio si osserva per mezzo del cannocchiale C, munito di *reticolo* (§ 78). Nella posizione di riposo dell'ago, si vede coincidere col centro del reticolo una data divisione della scala, p. es. lo zero, che è al centro. Se l'ago ruota, si vedranno passare nel cannocchiale le varie divisioni della scala, finchè si ferma in corrispondenza del centro del reticolo una certa divisione n. Da questa divisione, conoscendo la distanza dello specchio dalla scala, è facile calcolare con la Trigonometria, l'angolo α di cui ha ruotato lo specchio.

Così, p. es., è formato il **galvanometro Thomson**, di cui diamo solo la figura (Fig. 440), che arriva a misurare una corrente di 1×10^{-10} amp.

305. **Galvanometro di Depretz - D'Arsonval.** — L'azione fra corrente e calamita è scambievole; cioè invece di un circuito fisso su un ago mobile, si può fare agire un magnete fisso su un circuito mobile; allora questo si sposterà facendo una deviazione con la direzione del campo magnetico.

Tale principio è stato applicato nel **galvanometro di Depretz** (1) **- D'Arsonval** (2); esso è formato da una forte calamita a ferro di cavallo AA, fissa (Fig. 441), fra i cui poli è sospeso un telaietto moltiplicatore CC (§ 295), per mezzo di due fili HJ e DE di argento sottilissimo, per i quali si conduce la corrente al telaio. Dentro a questo, senza toccarlo, è sostenuto un cilindretto B di ferro dolce, fisso al sostegno M; esso ha lo scopo di raccogliere, per la sua permeabilità (§ 145), maggior numero di linee di forza dentro il telaio, cioè di intensificare l'azione magnetica su questo.

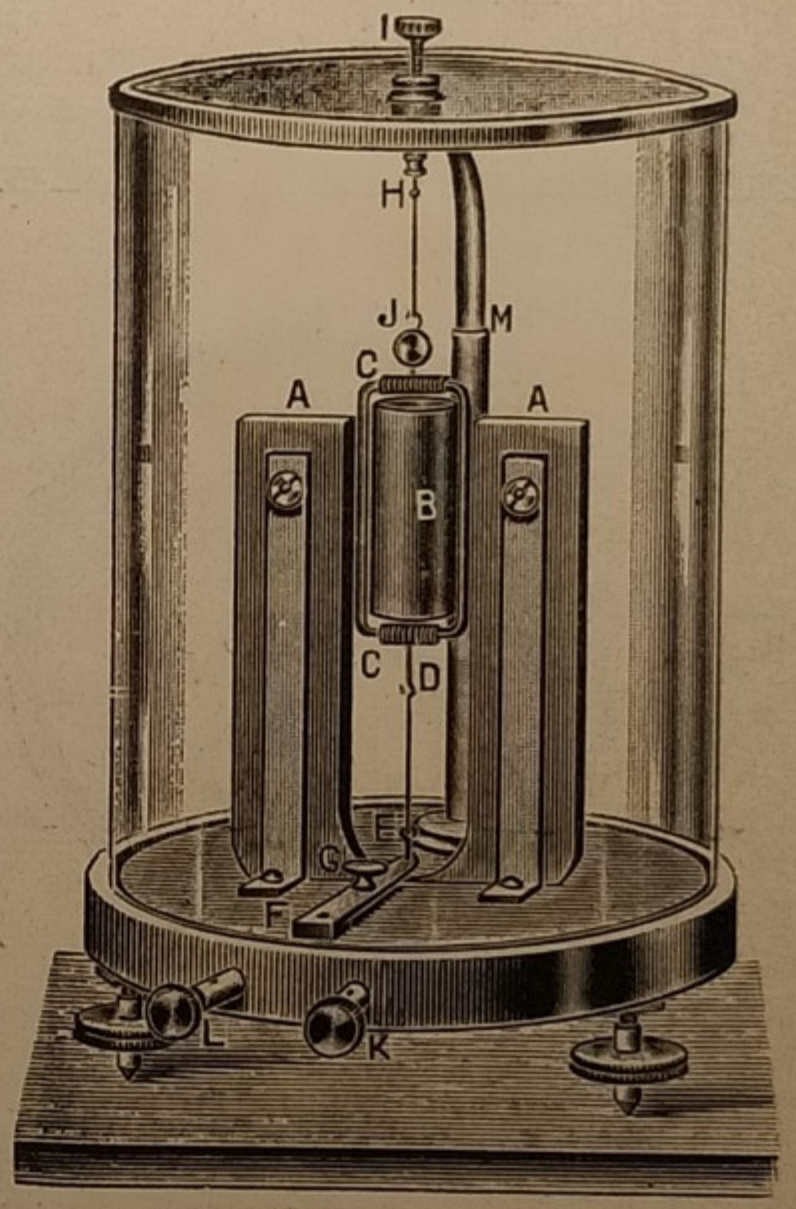


Fig. 441.

Sotto l'azione della corrente il telaio ruota sull'asse HE di un certo angolo; la deviazione si legge per mezzo di uno specchietto J unito ad esso, col cannocchiale e scala.

Questo galvanometro ha il vantaggio di non risentire alcuna influenza magnetica esterna, che è trascurabile rispetto al forte campo del magnete A; la sua sensibilità può raggiungere il valore di 1×10^{-8} amp.

306. **Amperometri.** — Sullo stesso principio dei galvanometri si costruiscono apparecchi meno sensibili, in cui la parte mobile è sostenuta da un perno, ed è riportata ad una posizione di riposo per azione di una leggera molla d'acciaio. Essi servono per la misura di correnti intense, e si chiamano **amperometri**; l'indicazione si legge direttamente per mezzo

---

(1) Depretz Marcel; n. a Châtillons-s. Loing nel 1843, m. a Vincennes nel 1918.
(2) D'Arsonval A., n. a Laborie nel 1851.

di un indice, su una graduazione fatta sulla faccia anteriore dello strumento, (Fig. 442).

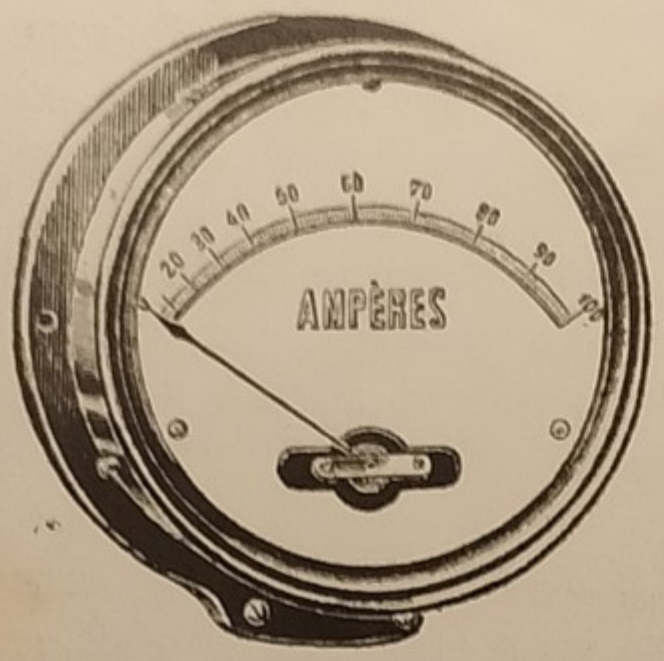


Fig. 442.

Vi sono amperometri basati sull'azione di un rocchetto fisso su un magnete o su un nucleo di ferro mobili, e si chiamano *elettromagnetici*; la Fig. 443 ne mostra lo schema: R è il rocchetto, N-N il nucleo. Ve ne sono basati sull'azione di un magnete fisso su un rocchetto mobile, come il galvanometro di Depretz-D'Arsonval, e si chiamano *magnetoelettrici;* la Fig. 444 ne mostra lo schema: M-M è il magnete ed R il rocchetto mobile. Questi ultimi sono più esatti, ma servono solo per corrente continua; mentre i primi possono servire tanto per corrente continua che per corrente alternata (§ 331).

Vi sono anche amperometri basati sulla dilatazione di un sottile filo metallico, che si riscalda e si allunga sotto l'azione della corrente; l'allunga-

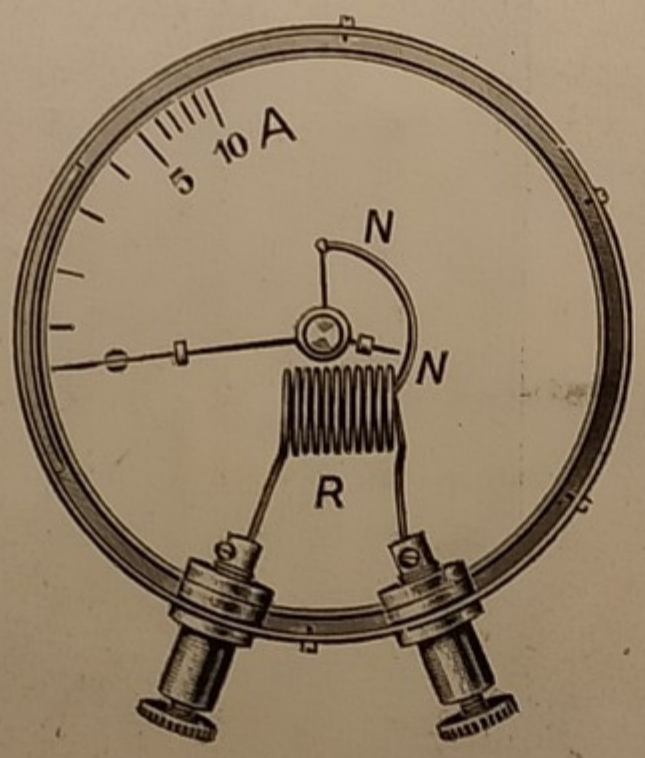


Fig. 443.

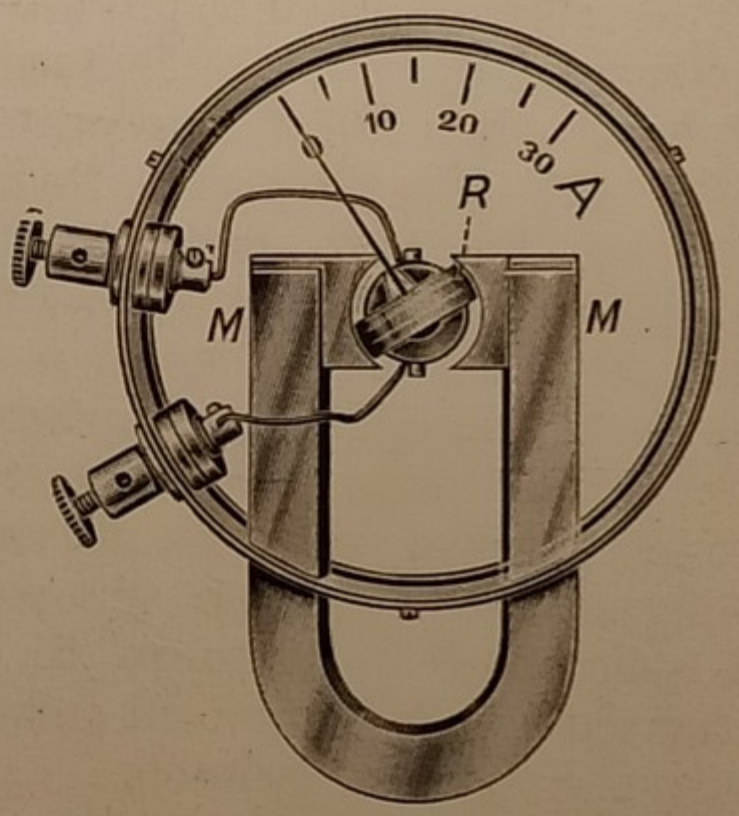


Fig. 444.

mento è funzione dell'intensità della corrente, e dalla misura di esso si può ricavare questa. Tali strumenti si chiamano *termici*, e servono tanto per corrente continua che alternata.

Tanto i galvanometri che gli amperometri, s'inseriscono nel circuito della corrente da misurare, tagliando il circuito in un punto, e collegando i due estremi ai due morsetti dello strumento, come è indicato schematicamente in A nella Fig. 445. Tal modo di inserzione si dice **in serie.**

307. **Voltmetro.** — Siano P e P' i poli di una pila (Fig. 445), e $P\,R\,P'$ il circuito di utilizzazione della corrente di essa. Inseriamo in due punti B e C del circuito un galvanometro V. Chiamando V_B e V_C i potenziali rispettivamente in B e C, i l'intensità della corrente nel ramo $B\,C$, r la resistenza elettrica di questo ramo (cioè praticamente la resistenza del galvanometro), si ha (§ 271 - 2): $V_B - V_C = i\,r$. Essendo r costante per un dato galvanometro, si ha che i varia proporzionalmente alla differenza

di potenziale $V_B - V_C$; quindi questa si può ricavare dalla misura di i; e se il circuito è aperto, si può ottenere il valore della *f.e.m.* corrispondente (§ 271).

Il galvanometro allora può servire per le misure delle *f.e.m.*; purchè la corrente i sia piccolissima, altrimenti varierebbe sensibilmente il valore di $V_B - V_C$; cioè purchè la resistenza del galvanometro sia molto grande.

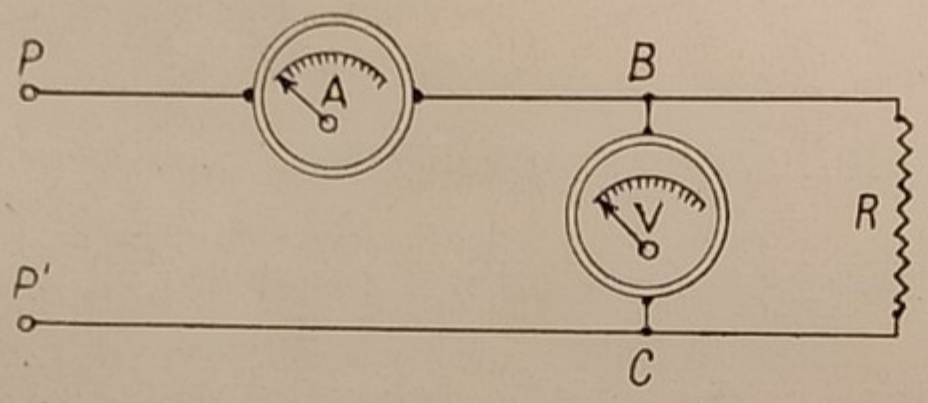


Fig. 445.

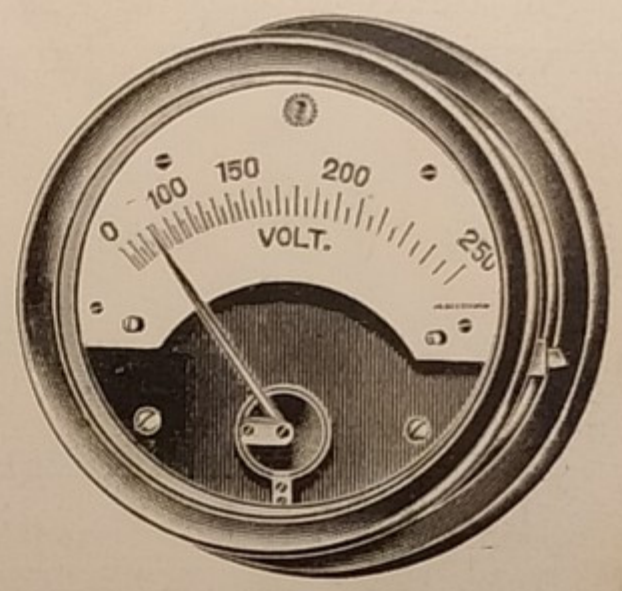


Fig. 446.

Un apparecchio per misure industriali costruito su tale principio, si chiama il **voltmetro**; esso è esternamente della stessa forma dell'*amperometro* descritto nel § 306. È rappresentato nella Fig. 446; anche ora l'indicazione della *f.e.m.* si legge direttamente per mezzo di un indice, su una graduazione fatta sulla faccia anteriore dello strumento. Il voltmetro adunque s'inserisce **in derivazione** tra i punti fra i quali si cerca la *f.e.m.*; si ricordi invece che l'amperometro va inserito **in serie** (§ 306). La Fig. 445 dà lo schema di tali inserzioni; in essa A indica l'amperometro e V il voltmetro.

308. **Galvanometri derivati.** — Abbiamo visto (§ 304) che i galvanometri sono apparecchi molto sensibili; essi non si possono quindi adoperare per la misura di correnti di discreta intensità. Si può togliere questa difficoltà, inserendo in derivazione tra i morsetti del galvanometro una resistenza r; in modo che nel galvanometro passi solo una frazione (nota) della corrente da misurare.

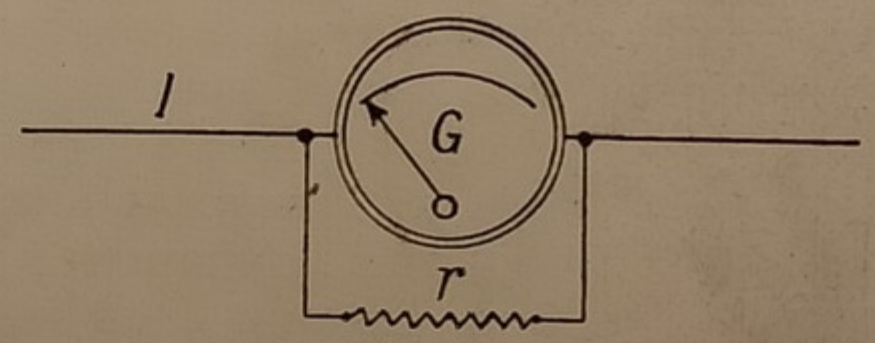


Fig. 447.

Sia G il galvanometro (Fig. 447), g la sua resistenza elettrica, r la resistenza della derivazione, I l'intensità della corrente da misurare, i l'intensità della corrente che passa nel galvanometro. Per le formule trovate (§ 276-12) è:

$$i = I \frac{r}{r+g}.$$

Facendo r uguale ad $^1/_9$, $^1/_{99}$, $^1/_{999}$ ... di g, è i uguale a $^1/_{10}$, $^1/_{100}$, $^1/_{1000}$ .... di I; che è lo scopo che si voleva raggiungere.

La resistenza r si chiama **derivazione** [1] ed il galvanometro si dice derivato. Naturalmente la resistenza r dev'essere di valore particolare per

(1) Nell'Elettrotecnica è quasi esclusivamente adoperata la parola inglese *shunt* ed il galvanometro si dice *shuntato;* non si comprende la necessità di tali vocaboli, quando esistono i nostri proprî ed italiani.

ciascun galvanometro, e la derivazione di uno non può servire per un altro.

La derivazione può servire anche per gli amperometri; munendo questi di varie derivazioni, intercalabili o l'una o l'altra con un commutatore, lo stesso strumento può servire per misure entro intervalli di intensità diversi.

Applicazioni delle elettrocalamite.

309. **Suoneria elettrica.** — Le elettrocalamite si prestano a numerose applicazioni, tutte le volte che si voglia produrre un movimento a distanza. Si può dire che nessuna invenzione, dopo quella della stampa, ebbe maggiore influenza sulla vita sociale, di quella dell'elettrocalamita. Vedremo infatti che sulle proprietà delle elettrocalamite sono basate le macchine odierne per la produzione dell'elettricità e della forza motrice. Ora ci limiteremo a descrivere i congegni che permettono di ottenere segnalazioni facili e comode a distanza, per mezzo della corrente elettrica. Tali sono gli **avvisatori elettrici,** che possono essere di forma ed uso assai svariato; qui accenniamo solo alle *suonerie* ed al *telegrafo*.

La **suoneria elettrica** permette di far suonare un campanello a distanza. Un impianto di suoneria comprende quattro parti:

1. **La pila,** cioè quella parte che genera la corrente necessaria al funzionamento dell'apparecchio. Dicemmo già al § 263 che si adopera comunemente la pila Leclanché, che può rimanere in funzione, senza molta sorveglianza, parecchi mesi e perfino qualche anno. Si adoperano almeno due elementi riuniti *in serie* (§ 279) per le distanze piccole; per le maggiori distanze se ne adopera anche un numero più grande.

Oggi le pile sono spesso sostituite da piccoli *trasformatori*, che alimentati dalla corrente stradale equivalgono ad esse, pur non consumandosi e non richiedendo perciò manutenzione; li descriveremo in seguito (§ 352).

2. **La linea** è il conduttore che trasmette la corrente necessaria al funzionamento della suoneria. È un filo di rame, da 0,5 a 0,9 mm. di diametro, fasciato con doppio strato di cotone. Lo strato interno è incatramato, perchè resista di più all'umidità; l'esterno è diversamente colorato, perchè armonizzi di più con la tappezzeria.

Fig. 448.

Questo filo si tende in alto sulle pareti delle camere, sostenuto da chiodi con isolatori d'osso o semplicemente ricoperti con nastro isolante; e scende in basso a portata di mano, sino al congegno per la chiamata.

3. **Il bottone** è l'organo che trasmette il segnale. È formato da un dischetto di legno *G*, su cui sono fissate due laminette *L* ed *L′* di metallo (Fig. 448); esse stanno una sull'altra senza toccarsi. Quella superiore fa da molla; su di essa poggia un *bottone* *M*; un coperchio di forma opportuna copre il congegno. Con le due laminette comunicano i due capi della linea in cui deve passare la corrente; ma questa non può oltrepassare il bottone, perchè tra le due mollette vi è interruzione.

Se si preme M col dito, si spinge la molletta L' sull'altra e si forma un contatto per il quale passa la corrente, che si trasmette così al campanello.

Vi sono in pratica forme svariatissime di questi congegni di chiamata: a *pressella*, a *pera*, a *ghianda*, ecc.; tutte basate sullo stesso principio di mettere in contatto due pezzi metallici, per i quali deve trasmettersi la corrente.

4. **Il campanello** è la parte in cui la corrente produce il segnale voluto, che è il suono di un timpano. Su una tavoletta di legno è fissata una elettrocalamita E (Fig. 449), avanti ai poli della quale è posta una sbarretta di ferro dolce I, sostenuta da una molla M; essa sorregge un filo di ferro che ha in cima un martelletto S, che può battere su di un timpano C. Contro la molla s'appoggia la punta di una vite V; le comunicazioni fra le varie parti sono chiaramente indicate nella figura.

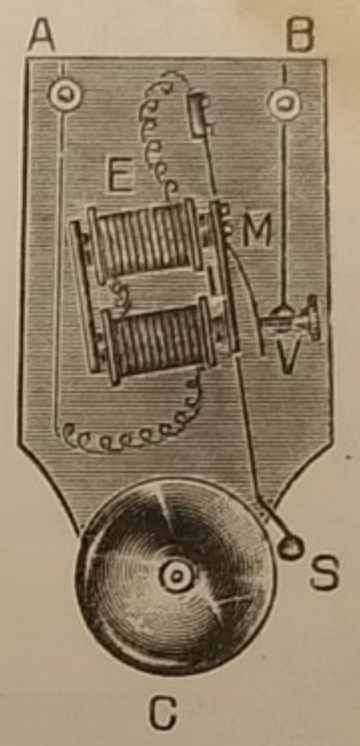


Fig. 449.

Quando si preme il bottone, la corrente della pila per il morsetto B, la vite V e la molla M, passa nell'elettrocalamita E e per il morsetto A ritorna alla pila; il circuito è chiuso, l'elettrocalamita si magnetizza ed attira la sbarretta I, ed il martelletto S batte un colpo sul timpano C. Ma allora la molla M si scosta da V e in questo punto non essendovi più contatto s'interrompe la corrente; l'elettrocalamita si smagnetizza e lascia andare la sbarretta I, che dalla molla è ricondotta indietro. Si ripristina così nuovamente il contatto con V e la sbarretta è nuovamente attratta, ed S batte un nuovo colpo sul timpano. E così di seguito, rapidamente, molte volte ad ogni minuto secondo, finchè si tiene premuto il bottone.

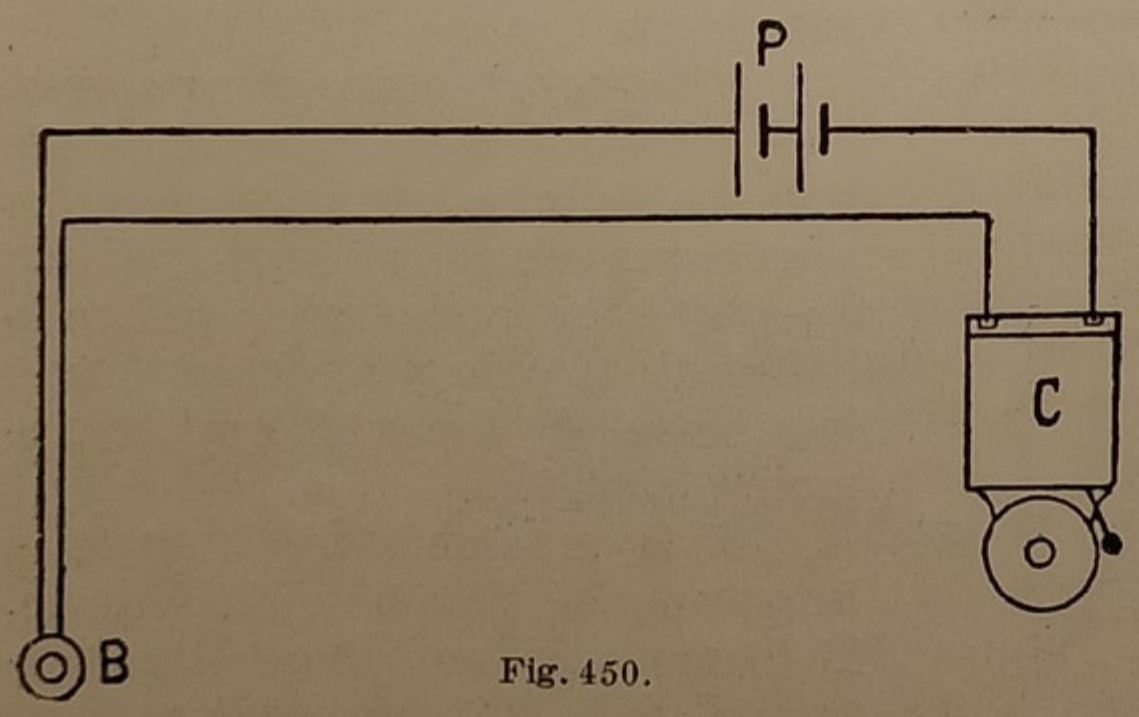


Fig. 450.

La Fig. 450 mostra lo schema di collegamento tra le varie parti, nel caso più semplice; B è il bottone, P la pila, C il campanello. Nella pratica gli impianti sono assai più complessi, dovendosi far suonare il campanello da diverse stanze, o far suonare diversi campanelli dalla stessa stanza. In questi casi è necessario aggiungere il **quadro indicatore**, per sapere da quale stanza viene la chiamata; ma non ci diffondiamo su quest'argomento, che sarebbe compito dell'elettrotecnica.

310. **Telegrafo Morse.** — Il **telegrafo** serve per trasmettere con l'elettricità, a distanza, segnali scritti che corrispondono alle lettere dell'alfabeto.

Il più adoperato è il sistema inventato dall'americano Morse [1], nel 1832 che descriviamo; anche ora vi sono quattro parti:

1. **La pila** è per lo più del tipo Daniell (§ 259), modificata in vario modo presso le varie Nazioni. Quella adoperata nel nostro Stato è la **pila italiana,**

(1) Morse Samuel; n. a Charlestown nel 1791, m. a New-York nel 1872.

rappresentata nella Fig. 451. È formata di un vaso di vetro con una strozzatura in mezzo, che lo divide in due scompartimenti. Nello scomparto superiore vi è un manicotto di zinco *Z*, appoggiato sulla strozzatura, ed immerso in una soluzione di acqua e solfato di zinco.

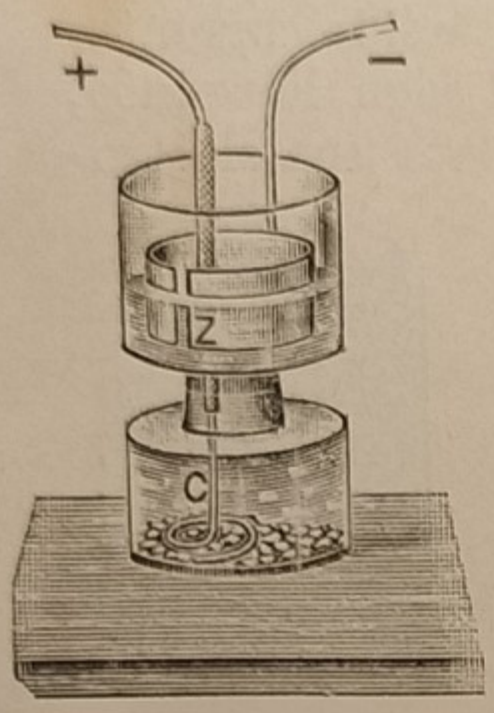


Fig. 451.

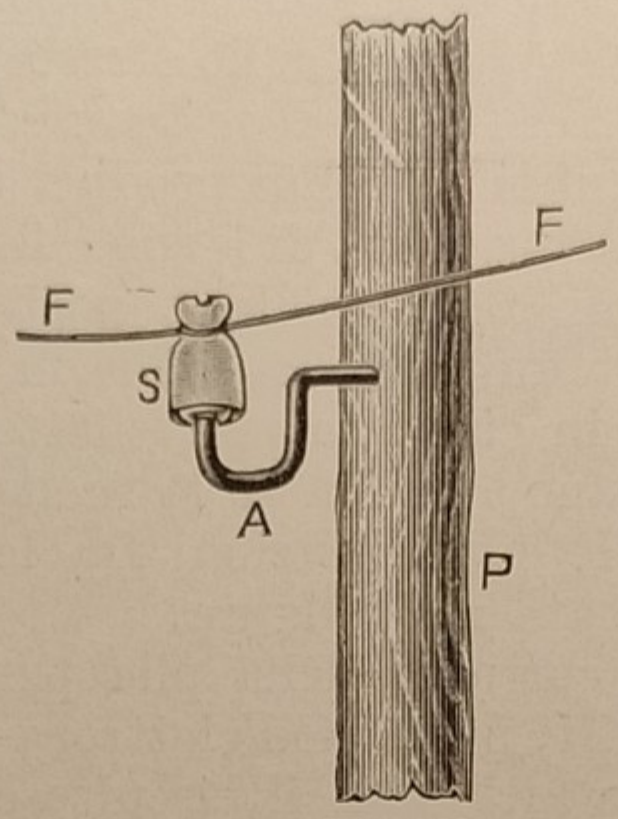


Fig. 452.

Nello scomparto inferiore, pieno di soluzione satura di solfato di rame, è contenuta una lamina *C* di rame, verniciata nella parte superiore, per isolarla dal solfato di zinco. I due liquidi stanno separati nel mezzo della strozzatura, perchè hanno diversa densità.

Di questi elementi se ne adoperano parecchie decine, riuniti in serie; essi rimangono in funzione anche qualche mese.

2. **La linea,** che trasmette l'elettricità da un paese all'altro, è un filo di ferro zincato, da 3 a 5 mm. di diametro; è sostenuto, per mezzo di isolatori di porcellana *S* (Fig. 452), da pali di legno *P* piantati a distanza opportuna per la campagna.

Gli isolatori sono *a campana,* cioè vuoti di sotto, perchè vi sia una parte che rimanga asciutta anche quando piove (si ricordi che l'acqua è un conduttore); essi sono collegati al palo per mezzo di una bacchetta di ferro *A* opportunamente ricurva.

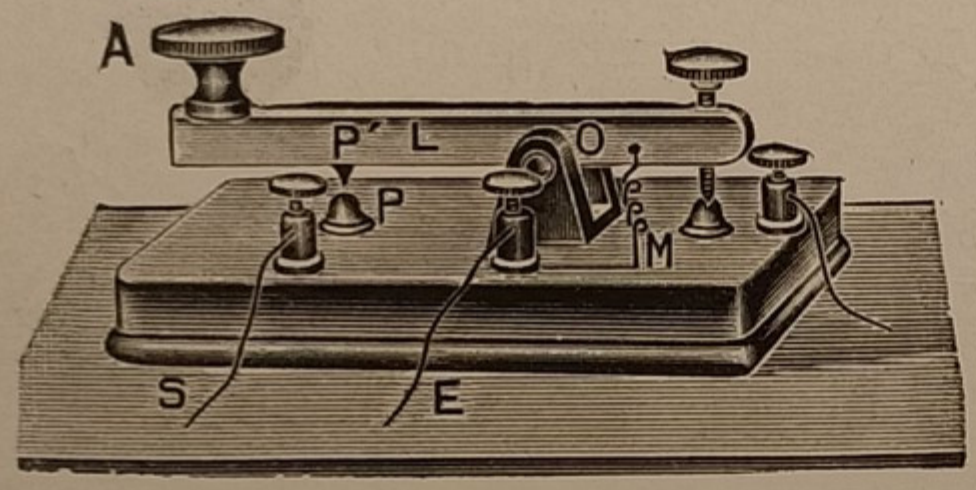


Fig. 453.

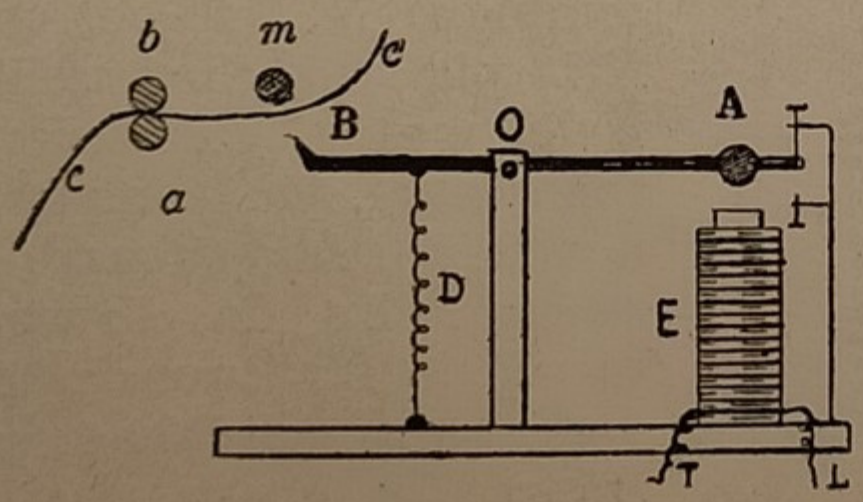


Fig. 454.

3. **Il manipolatore o tasto** è l'organo che trasmette il segnale. È formato da una sbarretta di ottone *L* (Fig. 453), che può ruotare attorno ad un perno *O* ed è sollevata da una parte per la trazione di una molla *M*, in modo che i due risalti *P* e *P′* di metallo restino alquanto discosti. Il risalto *P* comunica per mezzo del filo *S* con la pila: la sbarretta, per la molla *M* e per il filo *E*, comunica con la linea, e cioè col ricevitore lontano. La corrente della pila però non può passare nella linea, per l'interruzione che vi è tra *P* e *P′*. Ma se si preme con la mano su un pomello *A* di legno o di osso, il tasto si abbassa, si toccano le punte *P* e *P′* e la corrente passa per la sbarretta *L* e si trasmette per la linea al ricevitore. Questo passaggio avviene o per un breve istante o per un tempo alquanto più lungo, a secondo che si preme un po' meno o un po' più sul tasto.

4. **Il ricevitore** è il meccanismo che riceve e scrive il segnale. È rappresentato schematicamente nella Fig. 454 ed in prospetto nella Fig. 455; nelle due figure la stessa lettera indica lo stesso organo dell'apparecchio.

Esso è formato da un'elettrocalamita *E*, collegata con la linea, e che riceve da questa la corrente quando si abbassa il manipolatore. Ricevendo corrente l'elettrocalamita si magnetizza, attira una sbarretta di ferro *A* e fa girare una leva *AB* attorno ad un perno *O*. L'estremità *B* della leva s'innalza e spinge una striscia di carta *CC*, detta **la zona**, contro una rotella *m* il cui orlo è sempre bagnato di un inchiostro grasso speciale. La zona si svolge da un rotolo *E* e scorre continuamente tirata dai rulli *a* e *b*, messi in rotazione da un congegno di orologeria, contenuto nella scatola *S*.

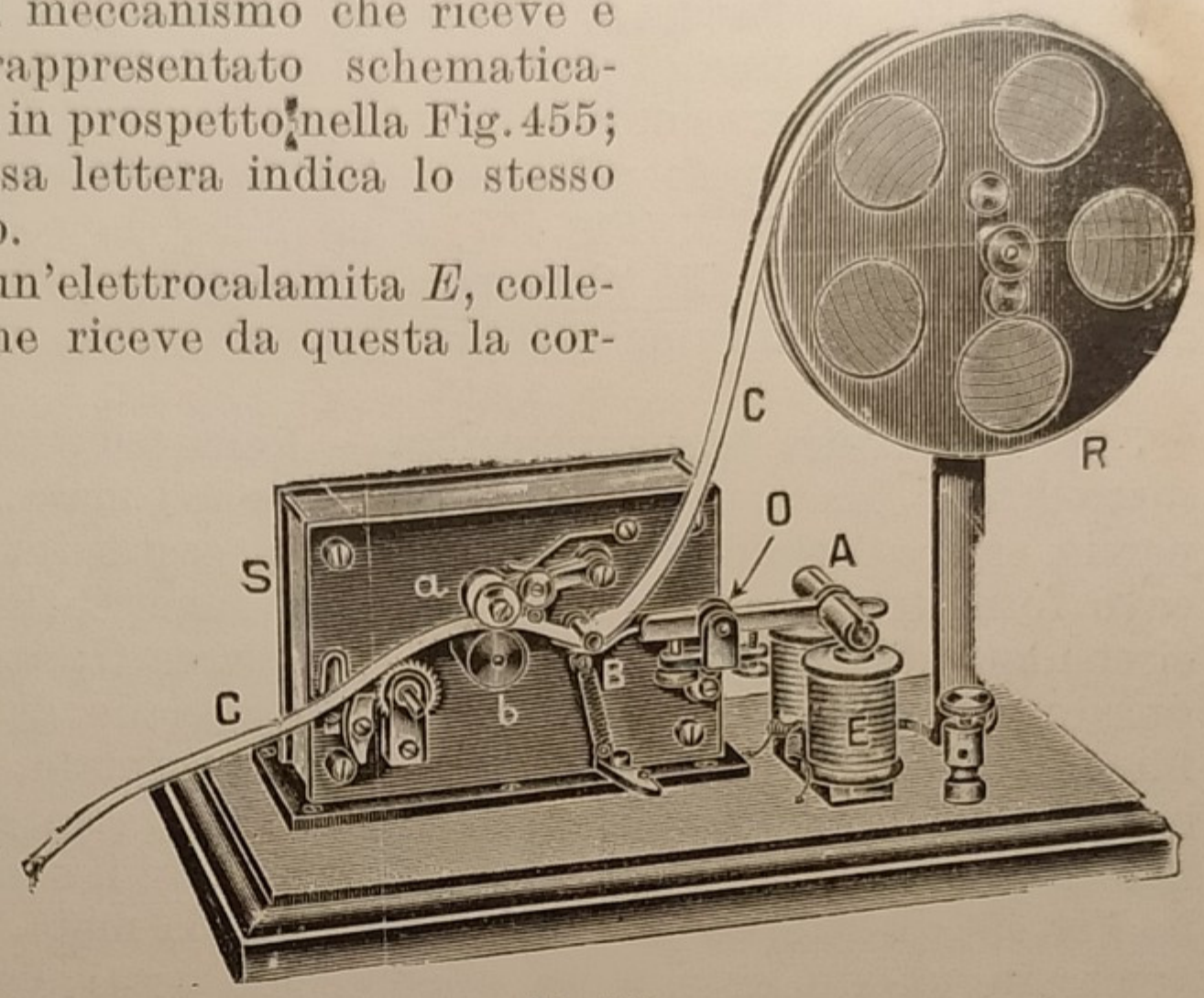


Fig. 455.

La carta rimane in contatto con la rotellina finchè passa corrente nell'elettrocalamita. Se la corrente arriva per un istante, la carta batte appena sulla rotella *m* e subito se ne scosta; vi rimane segnato *un punto*. Se la corrente arriva per un tempo un po' più lungo (sempre però per una frazione di secondo), la carta pur scorrendo rimane qualche momento in contatto con la rotella *m*, e vi resta segnata una corta *lineetta*.

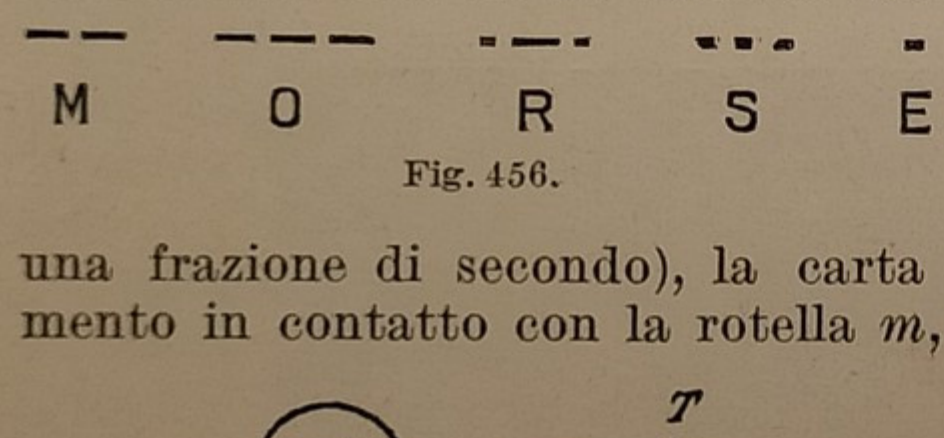


Fig. 456.

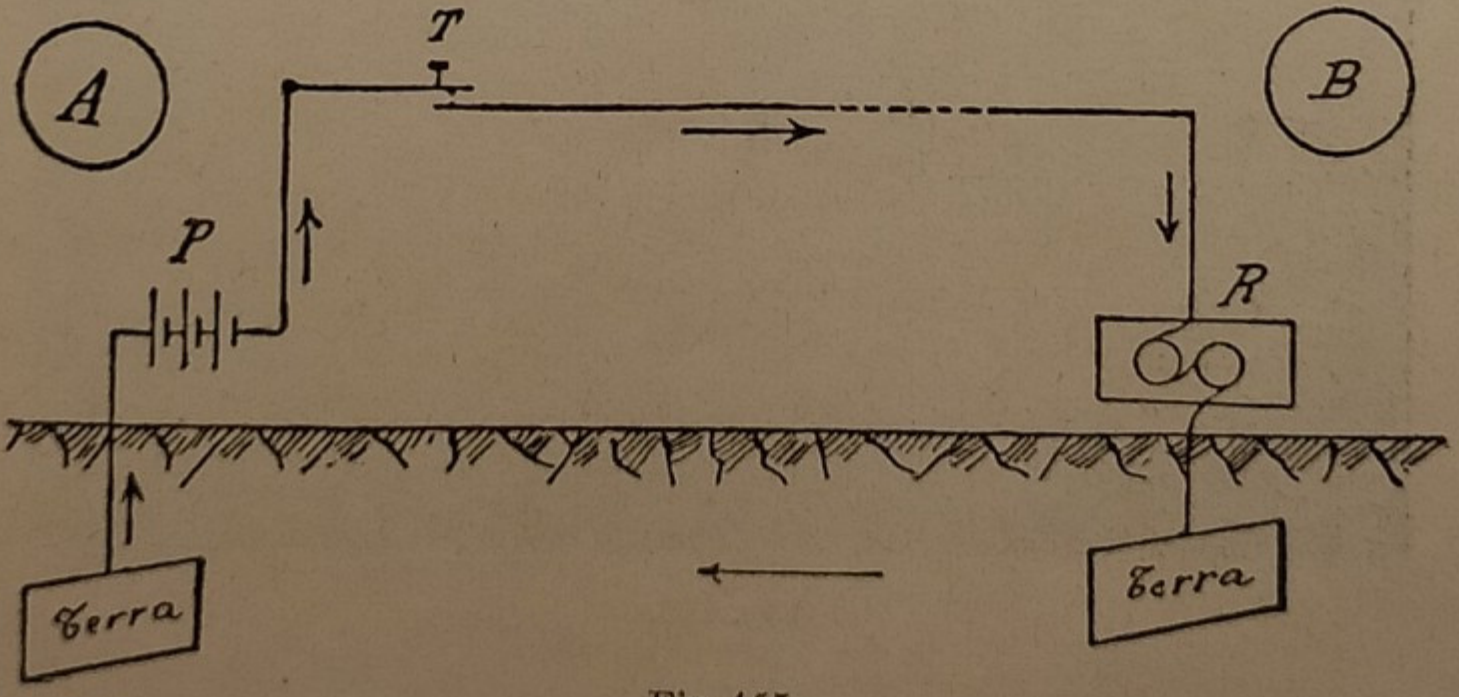


Fig. 457.

Così si possono segnare a distanza punti e linee, la cui combinazione forma un alfabeto convenzionale e altri segnali stabiliti. La Fig. 456 mostra i segnali corrispondenti alla parola *Morse*.

Il circuito che unisce il manipolatore al ricevitore, dovrebbe essere formato di due fili: uno di andata e l'altro di ritorno della corrente. Ma per economia si adopera come conduttore di ritorno la terra; cioè alla stazione di partenza A un polo della pila P ed alla stazione ricevitrice B un capo dell'elettrocalamita R (Fig. 457) sono messi in comunicazione con la terra. Ciò si fa portando i fili in comunicazione con lastre di rame o di piombo immerse in un pozzo.

311. **Telegrafia transoceanica.** — Nella telegrafia transoceanica la linea deve essere immersa nel mare, e deve perciò essere isolata dall'acqua. Essa è costituita da un **cavo** formato da una treccia di fili di rame C (Fig. 458), circondata da un grosso strato di guttaperca G; attorno a questo vi è uno strato di iuta su cui poggiano dei grossi fili di acciaio F, avvolti da canapa incatramata. Così il cavo ha grandissima resistenza alla rottura; esso esternamente ha l'aspetto d'una grossa fune, da cui il suo nome; la Fig. 458 lo rappresenta ridotto a circa la metà. Il ricevitore in questo caso è un apparecchio assai più sensibile di quello Morse; ma non lo descriviamo.

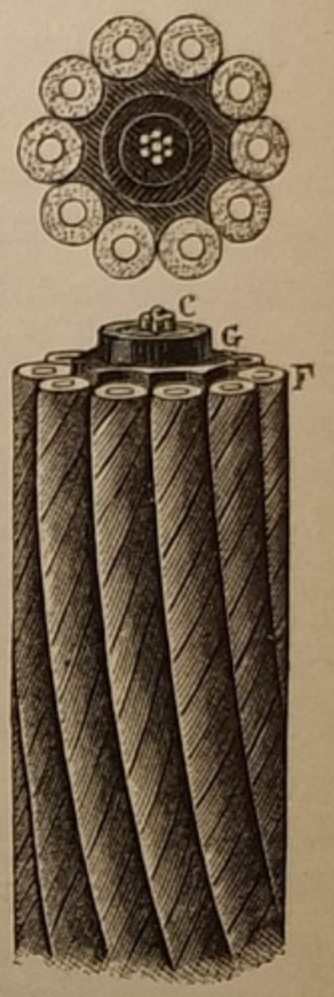


Fig. 458.

Il primo **cavo sottomarino** fu impiantato nel 1851, tra Calais e Dover; la Fig. 459 mostra un cavo in molte spire, nella stiva di un bastimento, dal quale esce e si distende nel fondo del mare.

Vi sono altri sistemi telegrafici più celeri del Morse, fra cui il **telegrafo stampante di Hugues,** che scrive direttamente in caratteri comuni le lét-

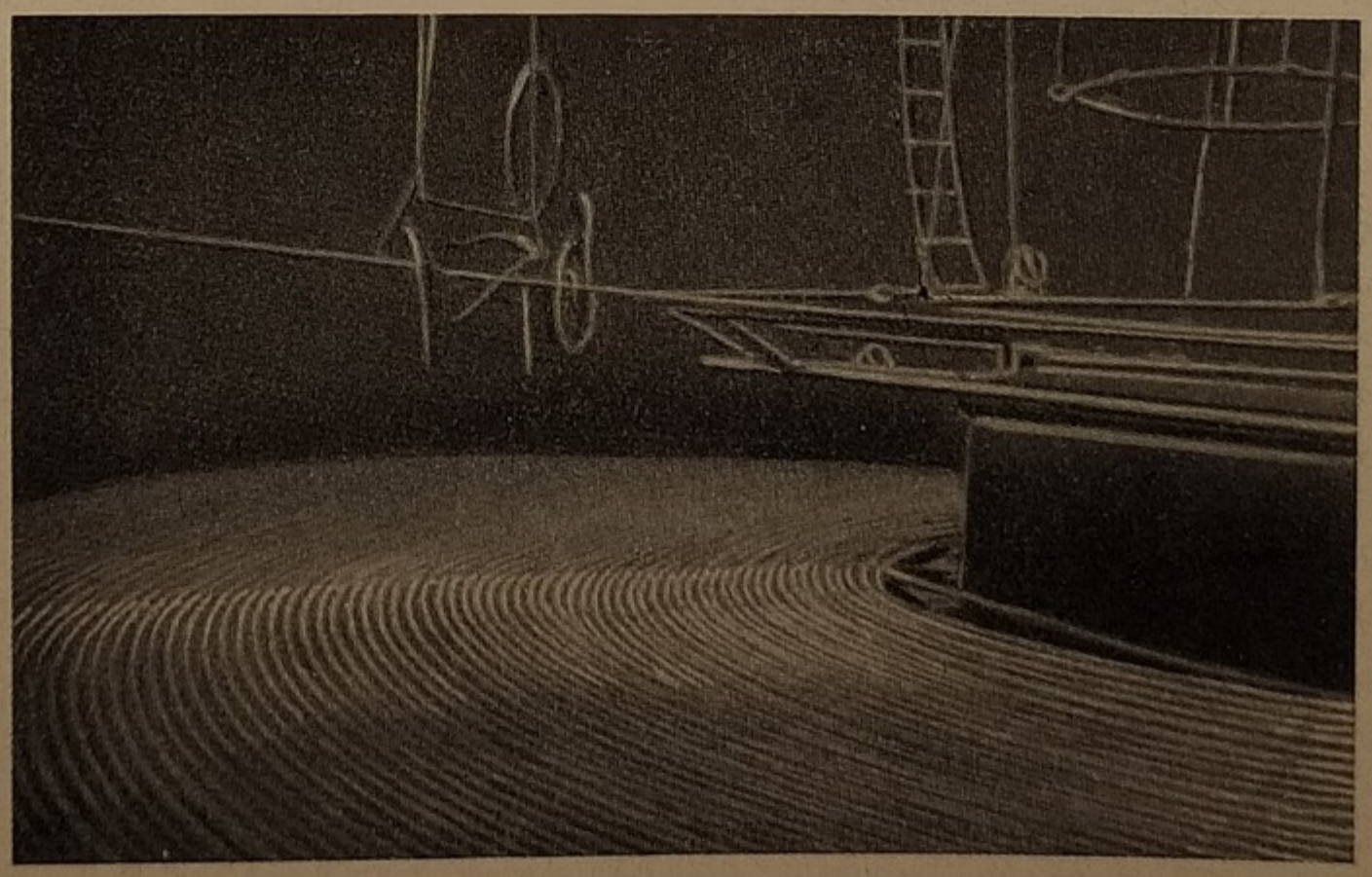


Fig. 459.

tere dell'alfabeto; ed il **telegrafo Wheatstone,** che trasmette contemporaneamente, a grandissima velocità, dalla Capitale ad ogni capoluogo di provincia, i resoconti parlamentari e le notizie ufficiali.

Ma non descriviamo questi apparecchi speciali.

312. **Orologi elettrici - Trasmettitori d'ordine.** — La corrente elettrica è stata anche impiegata per il movimento degli orologi. Vi sono due specie di **orologi elettrici:**

1. Orologi in cui l'elettricità è impiegata come forza motrice, sia per la ricarica automatica del peso o della molla motrice, sia per mantenere l'oscillazione del pendolo o del bilanciere. I primi sono preferibili, perchè assicurano il funzionamento dell'orologio anche nel caso di interruzione temporanea della corrente elettrica. I secondi funzionano solitamente con una pila a secco (§ 264), che può durare anche un anno e più. Questa categoria di orologi ha il vantaggio di non richiedere la ricarica periodica degli orologi ordinarî; ma non è esente dalla verifica e regolaggio del tempo, per gli eventuali ritardi o anticipi che essi subiscono.

2. Orologi simpatici in cui il movimento delle lancette dipende da un orologio centrale autonomo; questo invia impulsi di corrente (solitamente ad ogni minuto primo) che arrivando negli orologi ricevitori, per mezzo di una conduttura di distribuzione, provoca lo scatto dell'indice dei minuti. Il movimento dell'indice delle ore è ottenuto da quello dei minuti per mezzo di una *minuteria* usuale. In tal modo un solo orologio centrale può comandare molti orologi ricevitori, sparsi in uno stabilimento o nella città. Vi è l'inconveniente che la mancanza di ricevimento di uno degli impulsi di corrente, si traduce in un ritardo nell'indicazione dell'ora; quindi anche questi orologi esigono verifiche periodiche.

I **trasmettitori d'ordine** servono a provocare a distanza il movimento di un indice, che muovendosi su un quadrante si arresta in corrispondenza di una parola o di una frase scritta sul quadrante, indicando così l'ordine trasmesso. Sono impiegati, ad es., su tutti i bastimenti, per trasmettere dal ponte di comando sino alla sala del macchinista, gli ordini del capitano riguardanti il movimento della nave. Anche ora si tratta di impulsi di corrente, provocati nel trasmettitore dal movimento di un organo comandato dal capitano, che si traducono in movimenti nell'indice del ricevitore.

Non possiamo entrare in dettagli nella descrizione di questa categoria di apparecchi.

Azioni elettrodinamiche.

313. **Le azioni elettrodinamiche** sono le azioni di movimento che si esercitano tra conduttori percorsi dalla corrente elettrica.

Poichè i fili percorsi da corrente generano un campo magnetico, era facile prevedere che si dovessero esercitare azioni attrattive o repulsive tra questi

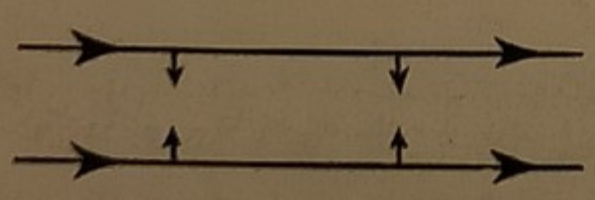


Fig. 460.

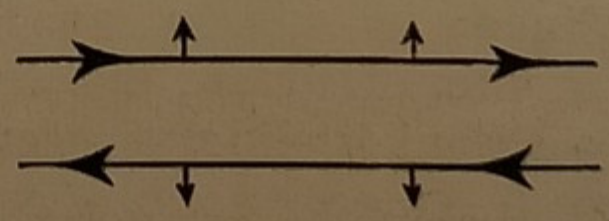


Fig. 461.

campi, e quindi tra i fili medesimi. Queste azioni sono governate dalle seguenti **leggi di Ampère:**

1. Due correnti rettilinee e parallele: si attraggono se dirette nel medesimo verso (Fig. 460); *si respingono se dirette in verso contrario* (Fig. 461).

2. *Due correnti rettilinee ad angolo: si attraggono* (cioè si dispongono parallelamente) *se sono dirette entrambe verso il vertice o entrambe se ne allontanano* (Fig. 462); *si respingono* (cioè si dispongono ad angolo retto) *se invece una si avvicina al vertice, e l'altra se ne allontana* (Fig. 463).

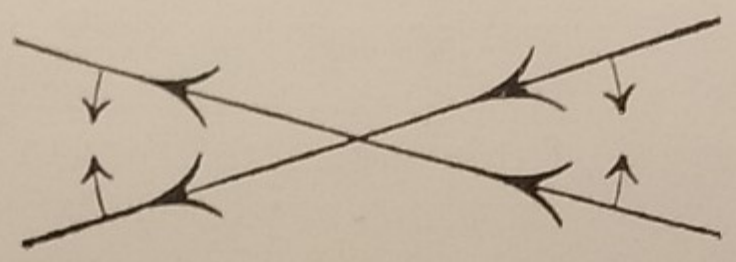


Fig. 462.

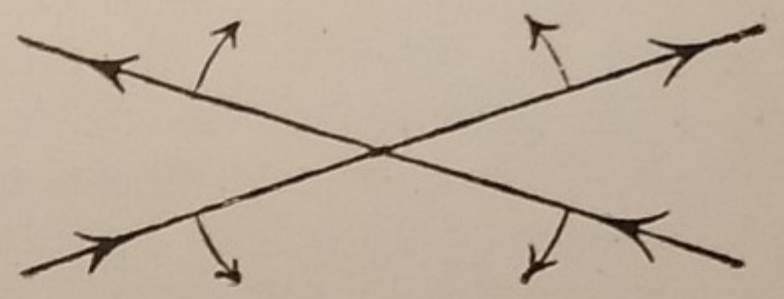


Fig. 463.

3. *Una corrente sinuosa esercita la medesima azione di una corrente rettilinea avente i medesimi estremi.*

La verifica sperimentale della 1ª legge è rappresentata in Fig. 464; ad un sostegno simile a quello già descritto al § 298, si appende una spira rettangolare, formata da un filo metallico, in cui passa la corrente. Si aspetta che il rettangolo si orienti e si fermi, come sappiamo (§ 298), col suo piano perpendicolare al meridiano magnetico. Indi si avvicina ad un lato CD un altro filo EF, fisso, anch'esso percorso da corrente; nel caso della figura, essendo le correnti CD ed EF discordanti, si vedrà CD allontanarsi. Se invece EF si dispone vicino ad AB, questo lato è attratto.

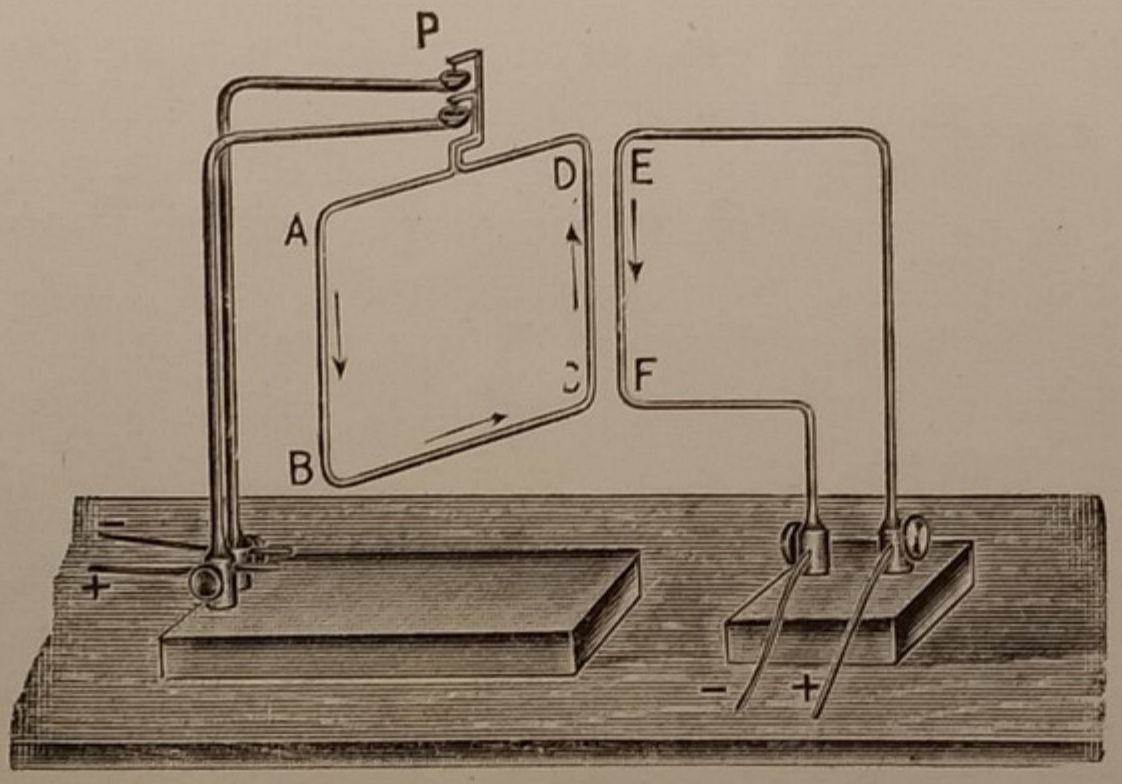


Fig. 464.

Per la verifica della 2ª legge si ponga il tratto EF sotto il lato BC in modo da fare angolo, ma senza toccarlo; si vedrà BC disporsi parallelamente ad EF se le correnti sono concordanti; si metterà invece in croce se le correnti sono discordanti.

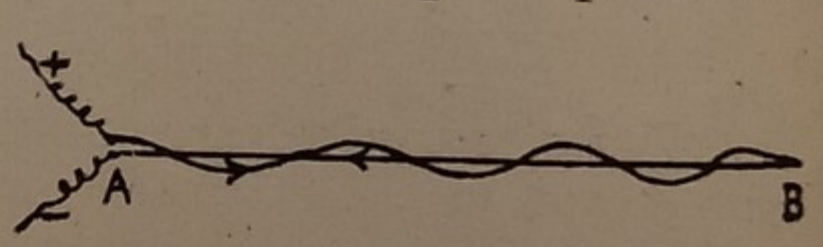


Fig. 465.

Per la verifica della 3ª legge, avvicineremo a CD un filo ripiegato come in Fig. 465, cioè avente un tratto sinuoso ed uno rettilineo; in questo caso C non si muove. Ciò vuol dire che i due tratti sinuoso e rettilineo si equivalgono, poichè le loro azioni si elidono essendo percorsi da correnti in senso contrario.

Le leggi di Ampère sono state da questi espresse con la formula:

$$1) \qquad F = \frac{2\, i\, i'\, s\, s'}{r^2}\left(\cos\varphi - \frac{3}{2}\cos\theta\cos\theta'\right)$$

nella quale s ed s' sono le lunghezze di due elementi di corrente, i ed i' le loro intensità (in *u.e.m.*), r la distanza tra i loro punti medi, φ l'angolo

che essi fanno tra ioro, θ e θ' gli angoli che essi fanno con la r, ed F la loro azione reciproca.

Tale formula comprende tutti i casi precedenti; ad es., il caso delle correnti parallele si ha per: $\varphi = 0$, $\theta = \theta' = 90°$, nel qual caso l'espressione tra parentesi diventa l'unità, e si ottiene:

2) $$F = \frac{2\, i\, i'\, s\, s'}{r^2}\,.$$

Le intensità i ed i' hanno un segno; se le correnti sono dirette nello stesso senso, i ed i' hanno segno uguale, F è positiva, e tra le due correnti vi è attrazione; se le correnti sono dirette in senso contrario, i ed i' hanno segno opposto, F è negativa, e le due correnti si respingono.

Esempio. — *Con che forza si attirano due fili rettilinei e paralleli, lunghi ciascuno cm.20, percorsi da correnti di intensità 12 e 15 amp. risp., alla distanza di mm.8?*

Dobbiamo porre nella 2); $i = 12$ amp. $= 12 \times 10^{-1}$ (*u.e.m.*) (§ 297) $= 1{,}2$;

$i' = 1{,}5$; $s = s' = 20$; $r = 0{,}8$; si ricava:

$$F = \frac{2 \times 1{,}2 \times 1{,}5 \times 20^2}{(0{,}8)^2} \text{ dine} = 2\,250 \text{ dine} = \textbf{g. 2,3} \text{ circa (Vol.1° - 85).}$$

314. **Conseguenze delle leggi di Ampère.** — Vi sono alcuni corollari dei principî ora enunciati.

1. Un conduttore flessibile di forma qualsiasi (Fig.466), se percorso dalla corrente assume forma circolare. Difatti, i due tratti di corrente AB

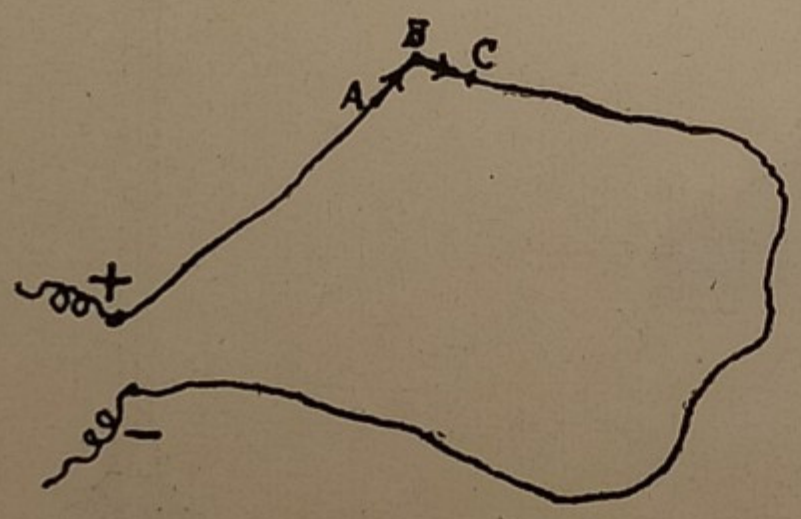


Fig. 466.

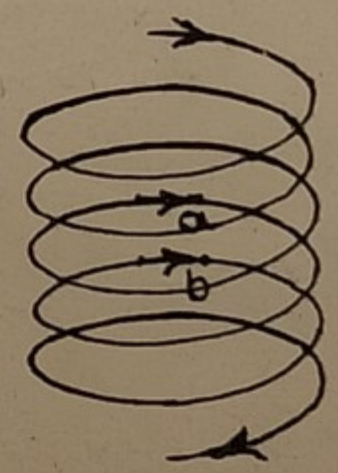


Fig. 467.

e BC aventi un estremo B in comune, possono considerarsi come due tratti rettilinei ad angolo percorsi da correnti in senso contrario; fra di essi vi è perciò azione ripulsiva. Ciò avvenendo in tutti i punti del conduttore, esso deve assumere la forma circolare.

2. Si abbia un'elica di filo metallico flessibile, in cui passi corrente. Due elementi di spire successive a e b giacenti su una medesima generatrice (Fig.467), possono considerarsi come tratti rettilinei e paralleli percorsi da correnti concordanti, che perciò si attirano. Cioè vi è attrazione fra tutti i punti delle varie spire posti sulla medesima generatrice. Se sospendiamo una tale spirale come è indicato in Fig.468, in modo che il suo capo inferiore O sfiori la superficie del mercurio contenuto in un bicchierino B, per

la suddetta attrazione tra le varie spire la spirale si accorcia, la punta *O* esce dal mercurio e la corrente vi si interrompe; le spire non più attratte si rilasciano, *O* ricade nuovamente nel mercurio e si richiude il circuito; si ristabilisce la corrente e la spirale torna ad accorciarsi. E così di seguito, la spirale assume un moto oscillatorio; essa si chiama la **spirale oscillante di Roget.**

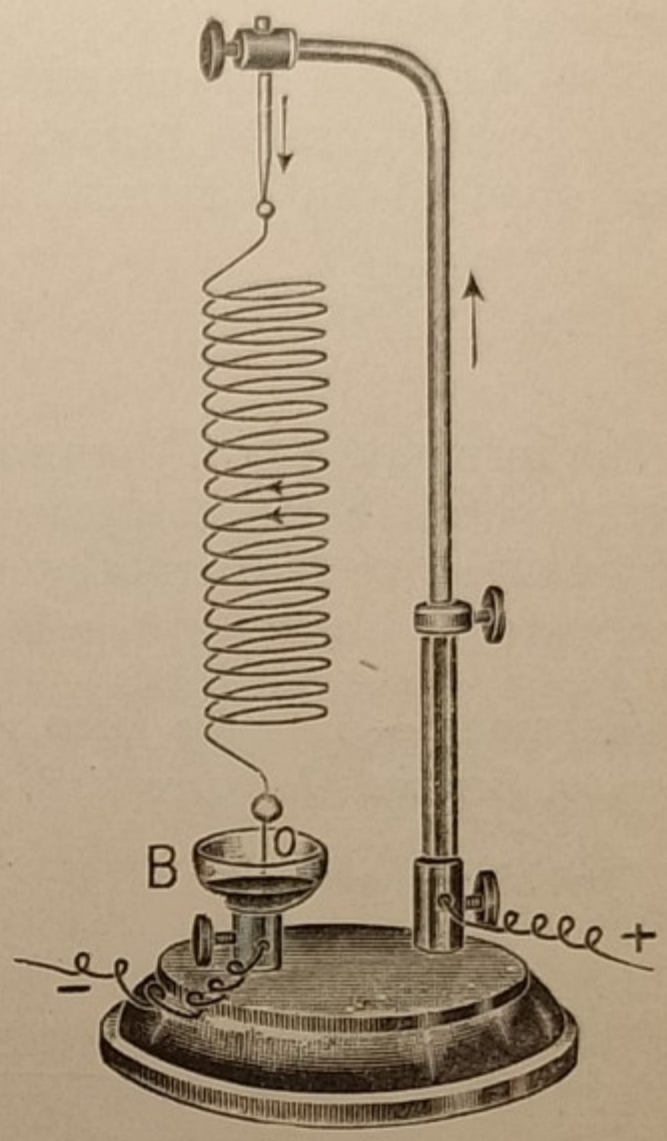


Fig. 468.

315. **Elettrodinamometro - Wattmetro.** — I galvanometri e gli amperometri fin qui descritti, non possono servire per le *correnti alternate* (§ 331); infatti il senso della deviazione dell'ago dipende dal senso della corrente elettrica, e s'inverte con l'invertirsi di questa. La corrente alternata, che s'inverte continuamente di senso, molte volte al secondo, produrrebbe un moto oscillatorio dell'ago; o più frequentemente, per inerzia, l'ago non seguirebbe abbastanza presto i singoli impulsi della corrente, e rimarrebbe fermo.

Ciò non avviene se all'ago si sostituisce un altro rocchetto, come è indicato in Fig. 469. In questa *A* è un rocchetto fisso e *B* un

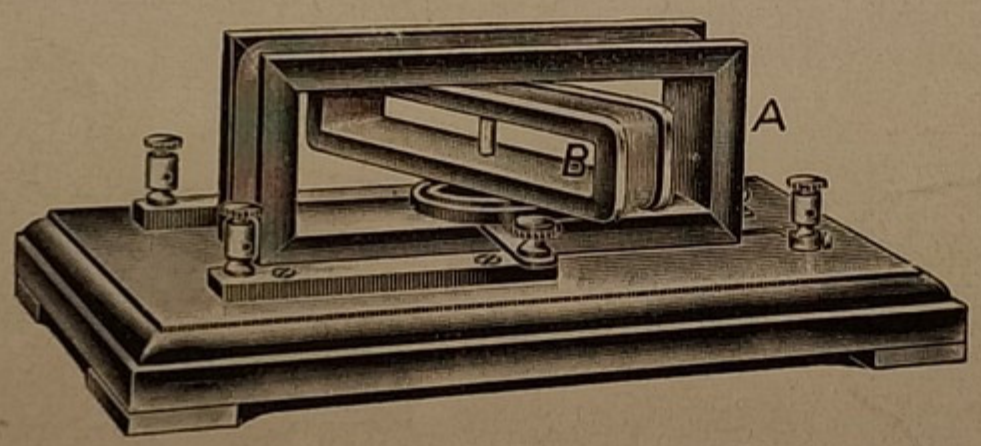


Fig. 469.

altro rocchetto girevole su un perno; gli avvolgimenti dei due rocchetti sono riuniti in serie, in modo da essere attraversati dalla medesima corrente. Se la corrente è alternata, allorchè s'inverte in *A* s'inverte contemporaneamente in *B*, e l'azione elettrodinamica tra i due rocchetti è sempre nel medesimo senso.

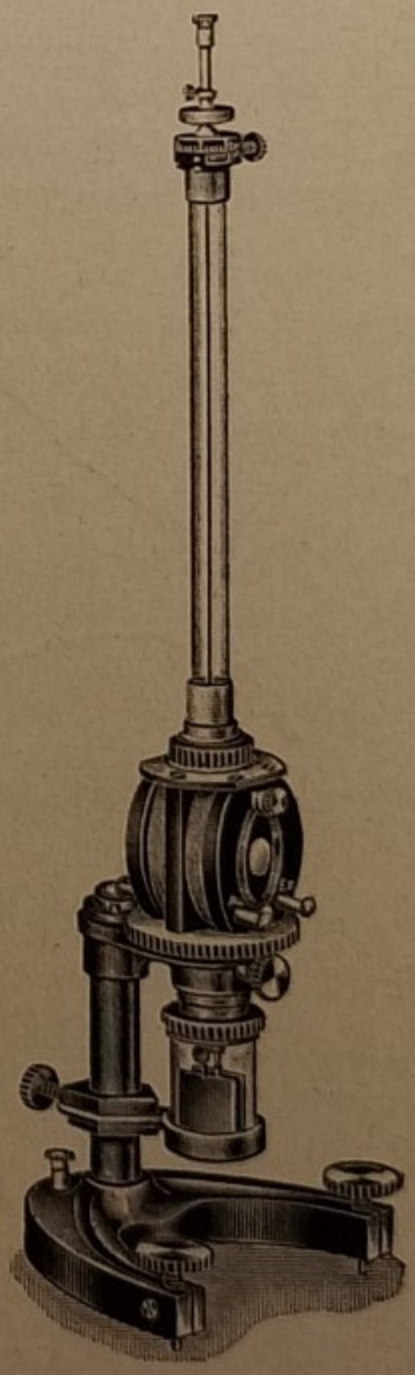


Fig. 470.

Gli strumenti basati su questo principio si chiamano **elettrodinamometri.** La Fig. 470 mostra l'*elettrodinamometro di Kohtrausch* la cui sensibilità è poco minore di quella di un galvanometro. Si costruiscono anche *amperometri* e *voltmetri elettrodi-*

namici, che servono tanto per le correnti continue che per quelle alternate. La Fig. 471 mostra l'interno di uno di tali strumenti. Se dei due rocchetti, uno è formato con filo grosso ed è inserito *in serie* con la corrente da misurare, la sua azione è proporzionale all'intensità di essa; se l'altro rocchetto è formato con filo sottile, ed è inserito *in derivazione*, la sua azione è proporzionale alla *f.e.m.* (§ 307). Allora, l'azione mutua totale tra i due rocchetti è proporzionale al prodotto della *f.e.m.* per l'intensità della corrente, cioè ai *watt*. In tal caso lo strumento serve per la misura della potenza della corrente elettrica, e si chiama **wattmetro**; anche esso serve tanto per le correnti continue che per quelle alternate.

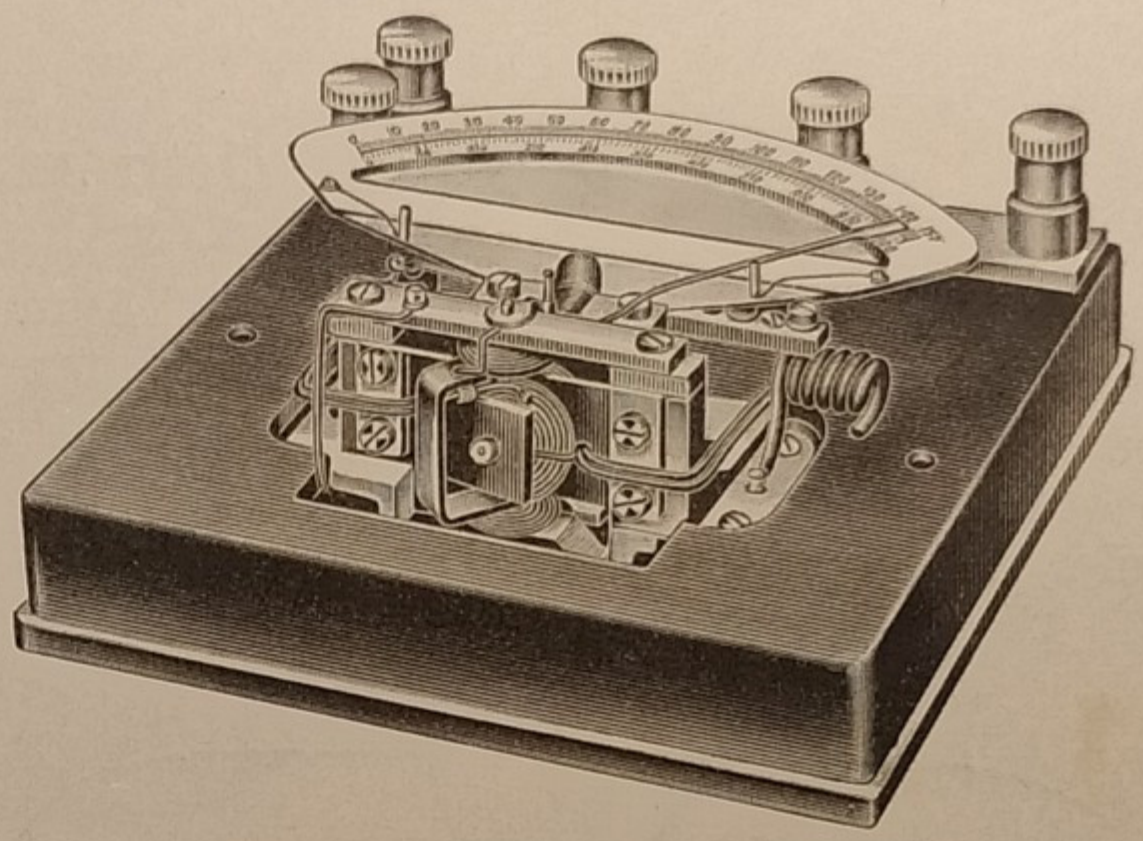


Fig. 471.

L'ENERGIA ELETTRICA ED IL MOVIMENTO

Induzione elettromagnetica.

316. **Induzione fra circuiti.** — Vi è un altro modo di generare la corrente elettrica, e cioè col movimento. Questo modo è assai importante, perchè permette di generare elettricità spendendo solo energia meccanica; e quindi a costo molto minore e in maniera assai più comoda che con le pile. È da questi nuovi fenomeni che è derivato il modo della produzione odierna dell'energia elettrica. Questa scoperta è dovuta all'inglese Faraday [1], nel 1831.

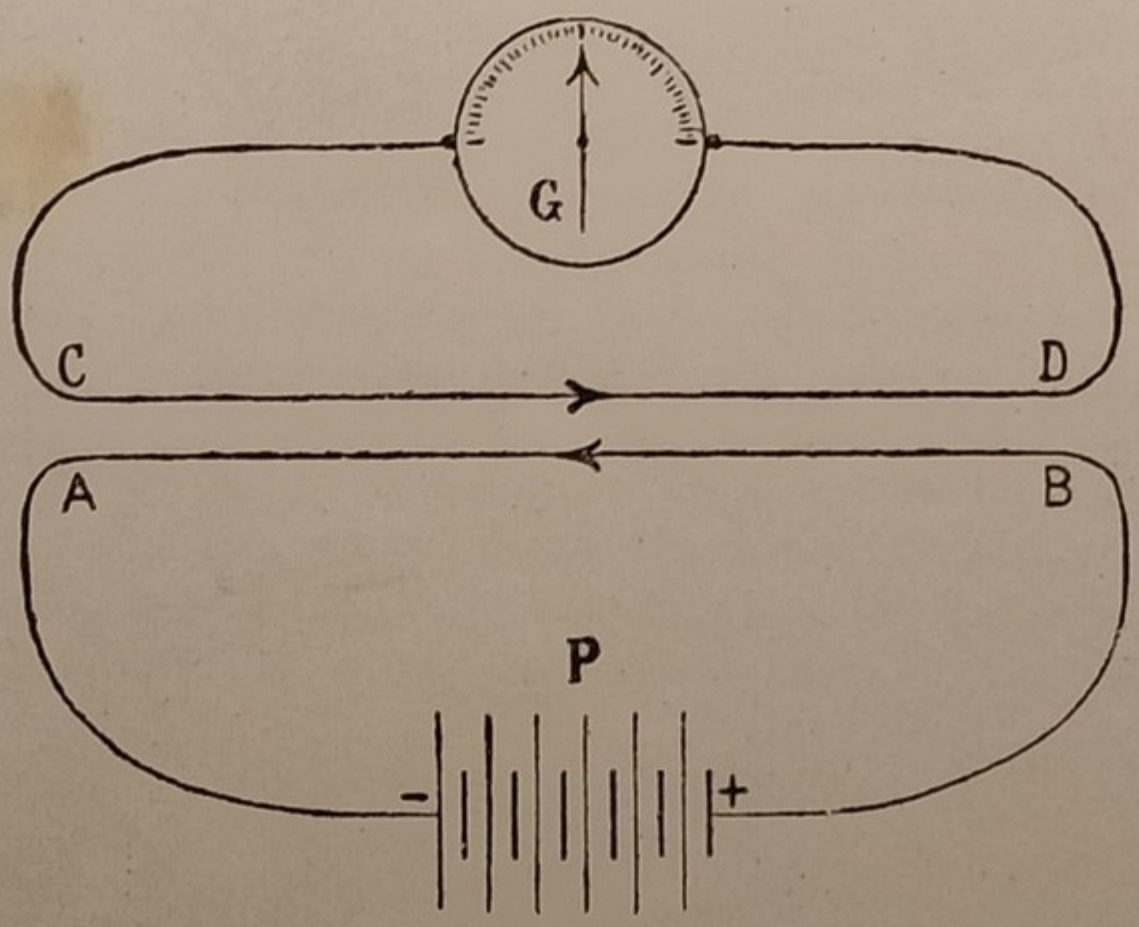


Fig. 473.

Supponiamo di prendere un filo rettilineo AB (Fig. 473), che faccia parte del circuito di una pila P. Sia CD un altro filo parallelo ad AB, che faccia parte di un altro circuito chiuso, comprendente un galvanometro G; questo naturalmente non segna corrente.

Ma se *avviciniamo* AB a CD (o viceversa), pur senza porli in contatto, vedremo che *per il tempo che dura il movimento*, cioè per breve tempo, il galvanometro segna una corrente, che è *di verso contrario a quella della pila;* subito dopo il galvanometro torna a zero e non si muove più. Se ora *allontaniamo* un filo dall'altro, si ottiene ancora una corrente di breve durata, che questa volta *è dello stesso verso di quella della pila*, che anche essa dura per il breve tempo che dura il moto di allontanamento.

Questo fenomeno si chiama **induzione**: dei due circuiti quello della pila si chiama **inducente** o **primario,** quello del galvanometro **indotto** o **secondario.** Le correnti ottenute si chiamano: la prima **corrente indotta di avvicinamento,** l'altra **corrente indotta di allontanamento.**

Ripetendo: *La corrente indotta di avvicinamento è discordante con quella inducente; la corrente indotta di allontanamento è invece concordante.*

La verifica sperimentale nelle condizioni sopradette sarebbe assai malagevole; poichè si richiederebbe una corrente inducente dell'intensità di parecchie decine di *ampère* ed un galvanometro molto sensibile, non potendosi manovrare un filo molto lungo. Si gira la difficoltà sostituendo a fili rettilinei, fili avvolti a spirale o meglio dei *rocchetti.*

---

(1) Vedi nota a § 245.

Adoperiamo allora due rocchetti; l'uno R in comunicazione con la pila P (Fig. 474); l'altro R' in comunicazione col galvanometro G, e cavo in modo da poter contenere R. Se si introduce rapidamente R in R' si osserva nel

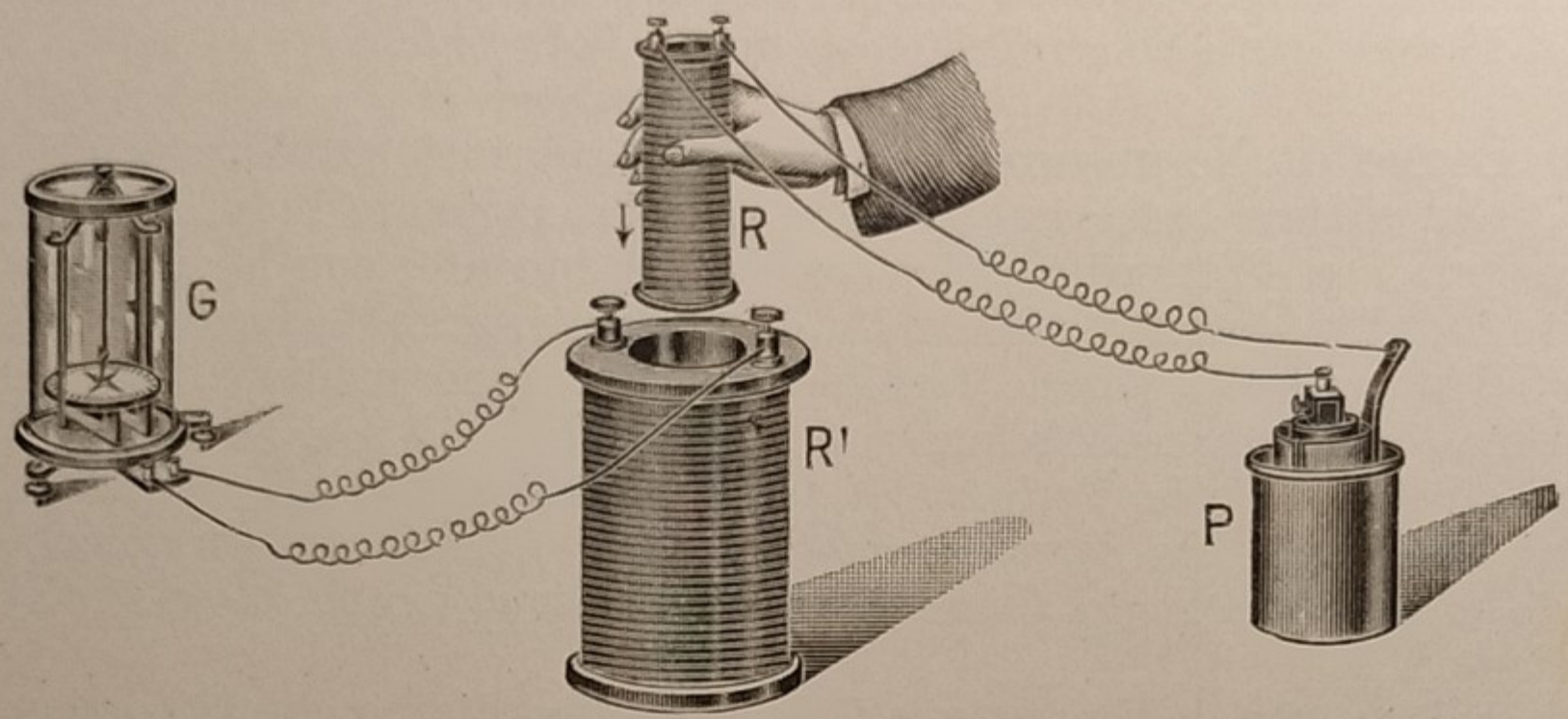


Fig. 474.

galvanometro una brusca deviazione in un senso, per la corrente indotta di avvicinamento che si è formata in R'; se si estrae R da R' si osserverà una deviazione in senso contrario alla prima, dovuta alla corrente indotta di allontanamento.

In questa esperienza è sufficiente adoperare in R una corrente di pochi ampère.

317. **Induzione con le calamite.** — Parimenti nel rocchetto R' si destano correnti indotte, se vi si introduce o si estrae un polo magnetico (Fig. 475); con l'osservazione che la corrente indotta prodotta dall'avvicinamento di un polo è di senso opposto a quella prodotta dall'allontanamento dello stesso polo; e la corrente indotta di avvicinamento di un polo Nord è pure opposta alla corrente indotta di avvicinamento di un polo Sud.

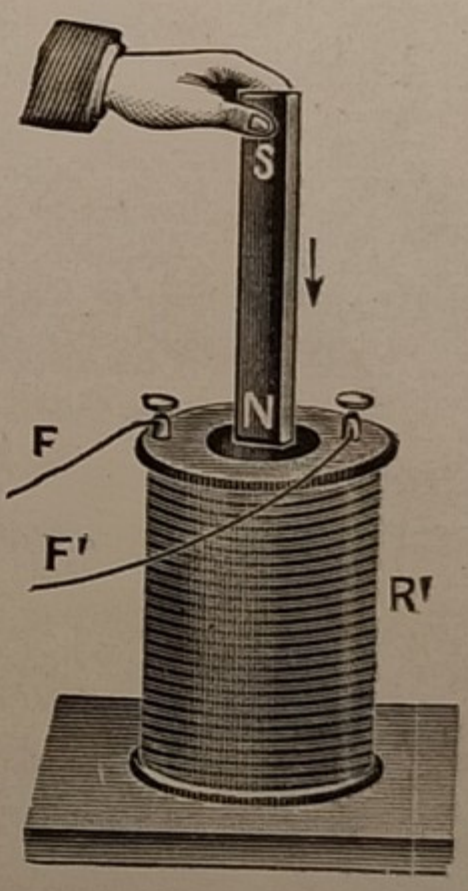


Fig. 475.

Si possono sommare gli effetti dell'induzione del rocchetto e della calamita, facendo uso di un rocchetto inducente come nella Fig. 474, ma introducendo in esso *un nucleo* di ferro dolce; questo si magnetizza per la corrente che circola nel rocchetto che lo circonda, e tanto il rocchetto che la calamita formatasi producono induzione concordante su R'.

318. **Correnti indotte di chiusura e di apertura.** — Non è necessario muovere il rocchetto R per avere induzione. Si ponga R dentro R'; ma il circuito di R sia interrotto, in modo che in questo rocchetto non circoli corrente. Chiudiamo ora questo circuito, cioè lanciamo in R la corrente; rispetto ad R' si otterrà lo stesso risultato che se avessimo immediatamente portato R da lontano dentro R'; cioè si otterrà una corrente indotta come quella di avvicinamento. La chiamiamo **corrente indotta di chiusura.**

Ora, anzichè allontanare R da R', si interrompa la corrente di R; si otterrà lo stesso effetto che per l'allontanamento, cioè una corrente indotta di allontanamento, che chiameremo **corrente indotta di apertura.** Dunque:

La corrente indotta di chiusura è contraria a quella inducente; la corrente indotta di apertura è concordante con quella inducente.

319. **Legge di Neumann.** — Si erano dapprima stabilite dal Faraday e dal Felici alcune leggi, in cui la *f.e.m.* della corrente indotta si metteva in relazione con l'intensità della corrente inducente, con la lunghezza del circuito indotto, con la distanza dei due circuiti, ecc. Ma in seguito il Neumann [1] raggruppò tutte le leggi in un'altra fondamentale, che porta il suo nome, e che si enuncia così:

Ogni volta che varia il flusso di forza che attraversa un circuito chiuso, si desta in questo una corrente indotta, la cui f.e.m. è proporzionale direttamente alla variazione del flusso ed inversamente al tempo in cui avviene tale variazione.

Così, nel 1° caso dell'induzione (Fig. 473), ricordiamo che la corrente che passa in AB genera attorno a questo filo un campo magnetico, le cui linee di forza sono i tanti circoli con centro su AB, in piani perpendicolari ad AB (§ 293). Se CD è lontano da AB, ben pochi di questi circoli attraversano la superficie CDG; avvicinando CD ad AB *aumenta* il flusso che attraversa tale superficie, e con l'allontanamento *diminuisce* tale flusso; in entrambi i casi si genera la corrente indotta.

Nel caso delle Figg. 474 e 475, il flusso di forza esce dall'estremità del rocchetto R o del magnete SN; e le linee di forza penetrano dentro R all'avvicinamento e ne escono all'allontanamento; anche in questi casi dunque varia il flusso che attraversa il circuito indotto; e infine si ha ancora variazione col chiudere o aprire il circuito inducente, senza muoverlo.

Chiamando con E la *f.e.m.* della corrente indotta, con φ e φ' il flusso inducente al principio ed alla fine della variazione, t la durata di questa variazione, la legge di Neumann si può scrivere:

$$1) \qquad E = k\,\frac{\varphi' - \varphi}{t}\,.$$

Il coefficiente k di proporzionalità dipende dalle unità di misura delle grandezze che compariscono nella formula e si assume $k = 1$ se tali grandezze si misurano in (*u.e.m.*). Se E è misurata in *volt*, φ in *gauss* per cm² (§ 140), t in secondi, risulta $k = 10^{-8}$ e quindi la 1) diventa:

$$2) \qquad E = 10^{-8}\,\frac{\varphi' - \varphi}{t}\ volt.$$

Risulta E positiva, se $\varphi' > \varphi$, se cioè la corrente indotta è dovuta ad un *aumento* di flusso; negativa nel caso contrario.

L'intensità i della corrente indotta, in un circuito di resistenza R, sarebbe per la legge di Ohm:

$$3) \qquad i = 10^{-8}\,\frac{\varphi' - \varphi}{R\,t}\ amp.$$

---

(1) Neumann Franz Ernst; n. a Ukermark nel 1798, m. a Königsberg nel 1895.

Ma vedremo in seguito (§ 339) che la legge di Ohm dev'essere alquanto modificata nel caso che la *f.e.m.* agente nel circuito è continuamente variabile.

Problema. — *Un rocchetto della sezione di 100 cm², con nucleo di ferro della permeabilità di 900 unità, è percorso da una corrente di 10 amp-spire per cm. Calcolare la f.e.m. della corrente indotta, che si sviluppa in un rocchetto di 50 spire che circonda il primo, se lo si allontana a grande distanza in 0,05 secondi.*

Soluzione. — Si ha: intensità del campo del rocchetto inducente, senza nucleo (§ 300 - 5): $H = (1{,}25 \times 10)\ gauss = 12{,}5\ gauss$;

flusso totale del rocchetto inducente, senza nucleo: $12{,}5 \times 100\ cm^2 = 1250\ (u.e.m.)$

» » » » » con nucleo: $1250 \times 900 = 1\,125\,000\ (u.e.m.)$

Quindi, (essendo $\varphi' = 0$), per ogni spira del rocchetto indotto, sarà per la 2):

$$E' = 10^{-8}\,\frac{1\,125\,000}{0{,}05}\ volt = 0{,}225\ volt\,;$$ e per 50 spire:

$$E = 50\,E' = (50 \times 0{,}225)\ V = \mathbf{11{,}25\ V.}$$

320. **Legge di Lenz.** — La legge di Neumann determina il valore della corrente indotta, ma non il senso. Questo è stabilito dalla seguente legge, dovuta a Lenz [1].

Il senso della corrente indotta è tale da opporsi al movimento che l'ha generata.

Spieghiamola, ad es., nel primo caso dell'induzione (Fig. 473); all'avvicinamento si desta in CD una corrente indotta di verso contrario a quella di AB; ma allora si hanno due fili paralleli, percorsi da correnti discordanti, che per la prima delle leggi di Ampère (§ 313) *si respingono*. Cioè si desta un'azione di repulsione che si oppone al moto di avvicinamento che genera la corrente indotta. Parimenti all'allontanamento la corrente indotta è concordante con quella inducente e i due fili si attirano, opponendosi al moto di allontanamento.

Nel caso dell'induzione con calamita (Fig. 475), se si avvicina un polo Nord al rocchetto R', la corrente indotta che si genera forma del rocchetto un solenoide (§ 300), nel quale si forma nella parte superiore un altro polo Nord; fra il polo del magnete e l'omonimo del rocchetto vi sarà allora ripulsione, che s'oppone al moto di avvicinamento del polo inducente.

Analogamente si ragiona negli altri casi.

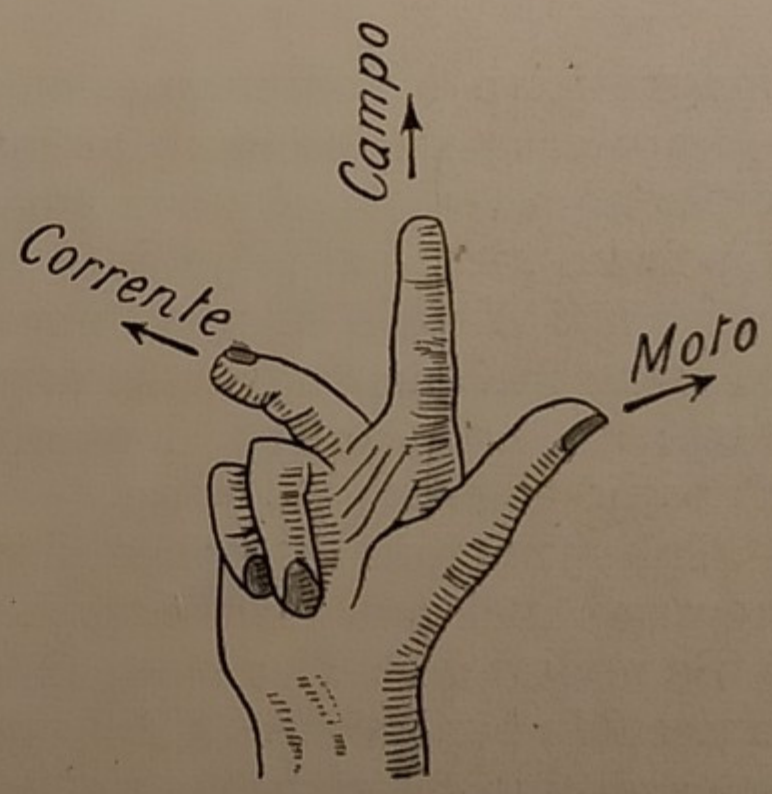


Fig. 476.

321. **Regola di Fleming.** — La direzione della corrente indotta si suole determinare praticamente per mezzo di una regola indicata da Fleming, detta anche **regola delle tre dita.** Si tendano le prime tre dita della *mano destra*;

---

(1) Lenz Robert, fisico dell'Univ. di Pietroburgo; n. a Pietroburgo nel 1833, m. in Finlandia nel 1903.

puntando l'indice nella direzione del campo magnetico e rivolgendo il pollice nella direzione del moto, *il medio indica la direzione e il verso della corrente indotta*, (Fig. 476).

322. **Correnti di Foucault.** — La legge di Neumann non specifica la forma del circuito indotto; questo può essere benissimo anche un conduttore massiccio di forma qualsiasi. Cioè le correnti indotte si destano anche nell'interno di un pezzo metallico qualsiasi, allorchè esso si muove tra poli

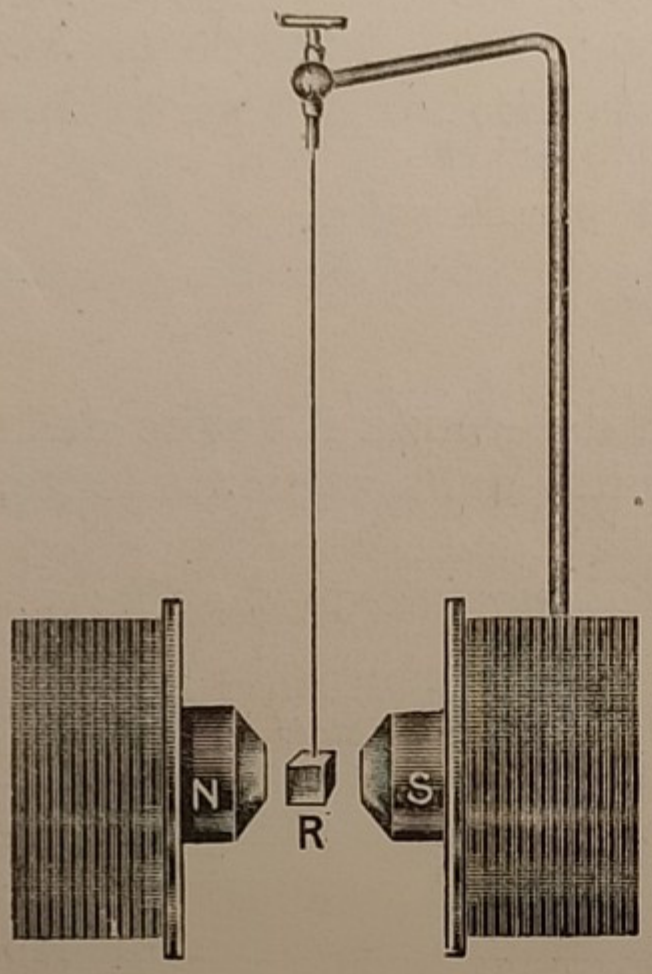


Fig. 477.

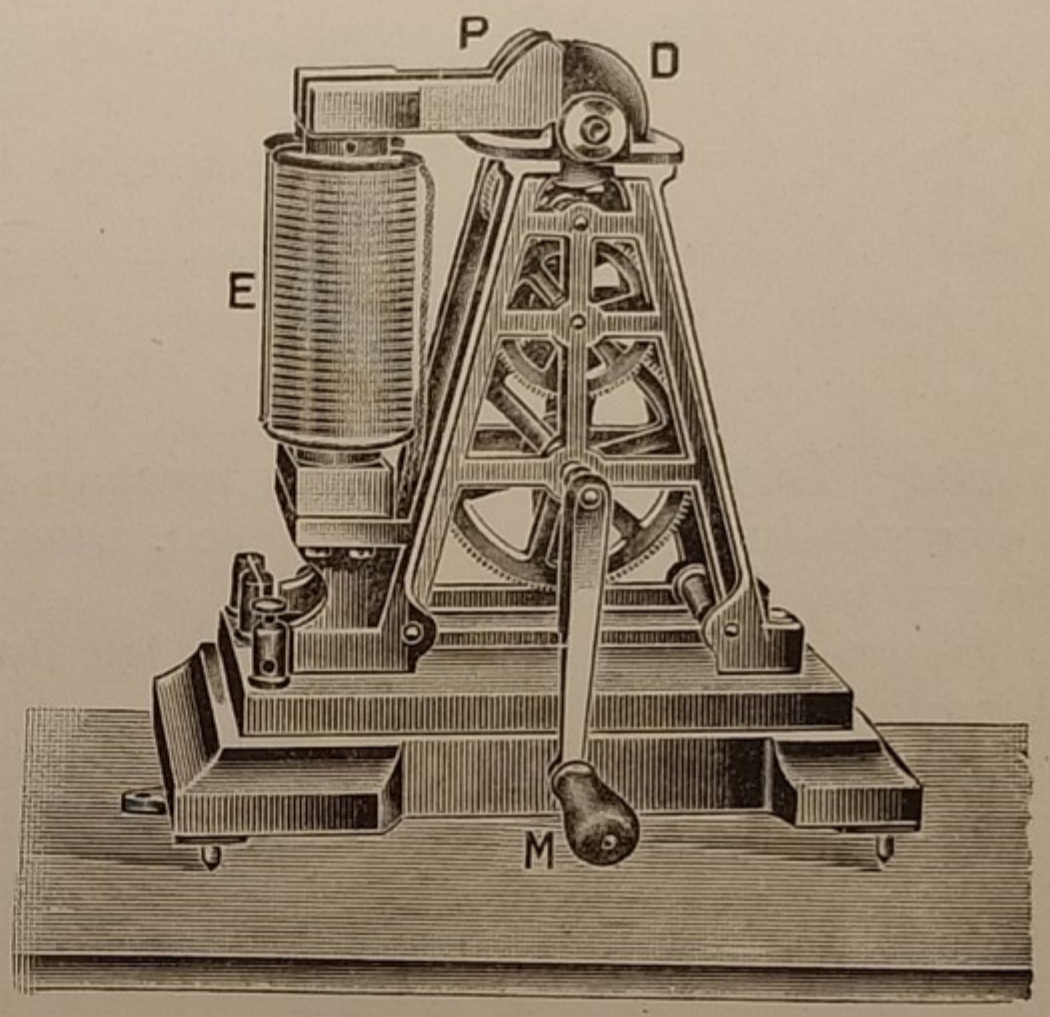


Fig. 478.

magnetici o è comunque collocato in un campo magnetico variabile. In questo caso si chiamano le **correnti di Foucault**; per la legge di Lenz esse tendono a frenare il movimento del corpo in cui si producono. Così, ad es., facciamo girare rapidamente un pezzo di rame R sospeso ad un filo, fra i poli affacciati N ed S di una forte elettrocalamita, (Fig. 477). Questa rotazione avviene facilmente, per la torsione del filo, se l'elettrocalamita non è eccitata; ma non appena si manda la corrente nei rocchetti di essa, il pezzo di rame si ferma di botto.

Tale principio si applica per smorzare l'oscillazione degli aghi dei galvanometri, nei *freni elettromagnetici*, ecc.

Se malgrado la frenatura si fa forza per far girare il pezzo di rame, questo si riscalda per le correnti di Foucault che vi si producono. Si prenda, p. es., un apparecchio formato da un'elettrocalamita E (Fig. 478), tra le cui espansioni polari P può ruotare, a grande velocità, un disco di rame D, per mezzo di un sistema di ingranaggi mossi da una manovella M. Se nell'elettrocalamita non passa corrente, basta un piccolo sforzo sulla manovella per produrre la rapida rotazione del disco D. Non appena si lancia corrente in E, si deve fare uno sforzo grande sulla manovella per mantenere la rotazione del disco; le correnti di Foucault che si generano in questo disco lo riscaldano talmente, da fondere della cera con cui esso era stato spalmato.

Le correnti di Foucault sono pertanto nocive e rappresentano una perdita di energia; si chiamano perciò *correnti parassite*. Vedremo in seguito come si potranno evitare nel macchinario elettrico.

323. **Autoinduzione.** — L'induzione avviene anche nello stesso circuito primario. Supponiamo che i due fili AB e CD della Fig. 473, si fondano insieme in un sol filo MN (Fig. 479), che funziona tanto da circuito inducente, quanto da indotto. Non potendosi più eseguire il movimento di un circuito rispetto all'altro, potremo solo parlare di correnti indotte di chiusura e di apertura. Così, se con un interruttore I chiudiamo il circuito PMN, al momento della chiusura si forma nello stesso circuito MN una corrente indotta di chiusura di verso contrario a quella della pila, e la corrente di questa viene in tale istante indebolita; cioè la corrente non passa allo stesso istante della chiusura, ma si forma gradatamente, con breve ritardo. Analogamente, se apriamo in I il circuito, si forma una corrente indotta di apertura, concordante con quella della pila, e perciò questa non s'interrompe istantaneamente, ma perdura ancora un istante di più; inoltre essendo questa breve corrente indotta di alta *f.e.m.*, provoca una scintilla nel punto in cui il circuito si è interrotto.

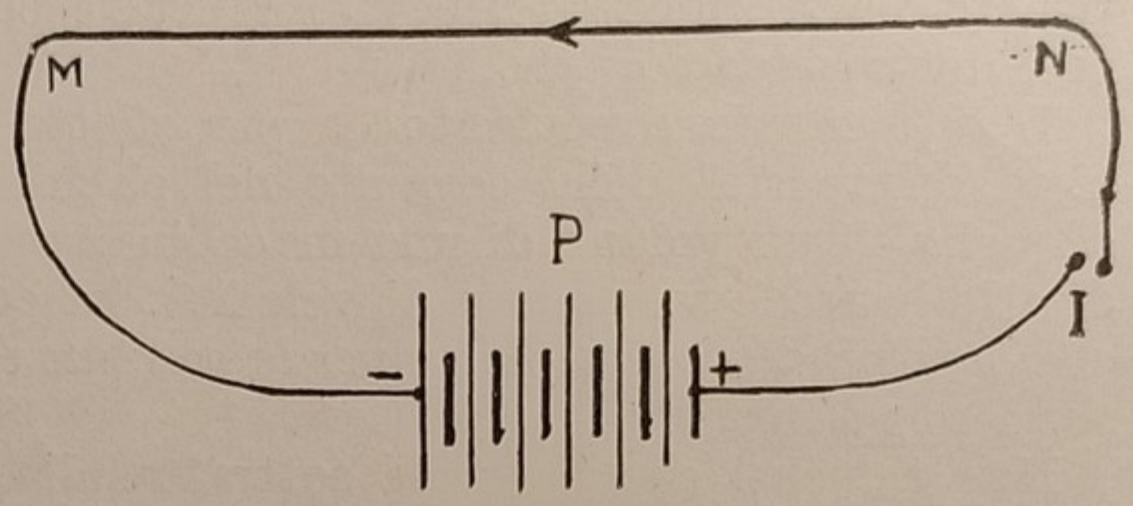


Fig. 479.

Si può rappresentare graficamente la variazione dell'intensità della corrente, con un sistema di assi cartesiani ortogonali, riportando come ascisse

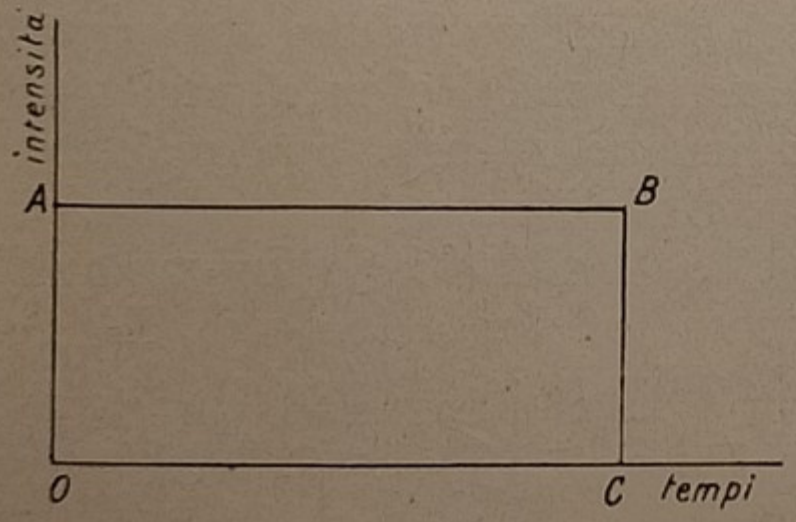


Fig. 480.

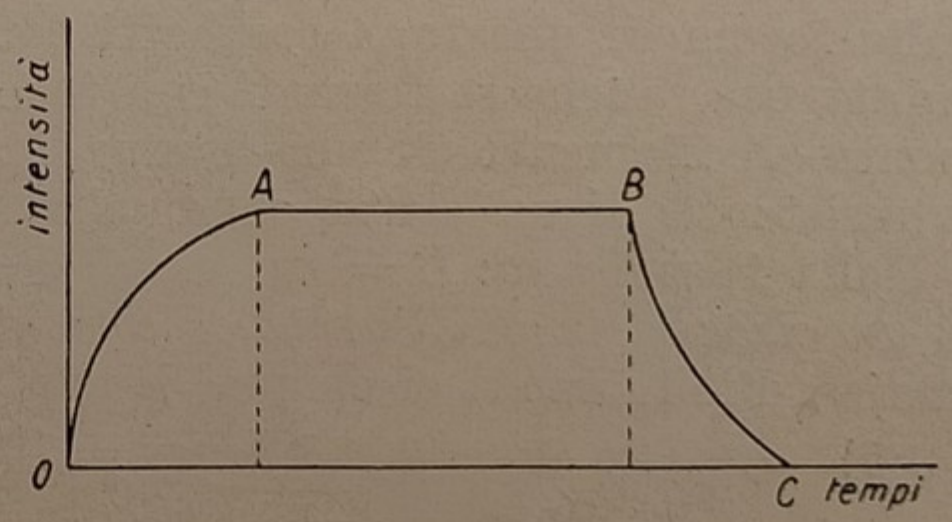


Fig. 481.

i tempi e come ordinate i valori corrispondenti delle intensità. Se la corrente assumesse il suo valore $i = OA$ nel medesimo istante della chiusura del circuito e si annullasse istantaneamente all'apertura, il *diagramma delle intensità* sarebbe il segmento AB, parallelo all'asse delle x, (Fig. 480). Invece, per effetto dell'autoinduzione, alla chiusura del circuito l'intensità cresce a principio gradatamente, come indica il tratto OA del diagramma (Fig. 481), raggiunge il suo valore normale in A, e lo mantiene sino al momento dell'apertura, per poi annullarsi gradatamente e non istantaneamente, come indica il tratto BC del diagramma.

Questo fenomeno si chiama **autoinduzione** o (dall'inglese) **selfinduzione** (spesso abbreviato in self.). Queste brevi correnti si chiamano **extracorrenti**: *di chiusura* l'una, *di apertura* l'altra. Questi fatti hanno riscontro con quanto avviene in una conduttura d'acqua; aprendo il rubinetto l'acqua non esce all'istante, richiedendo un breve tempo, *per la sua inerzia*, per mettersi in moto nel tubo; viceversa chiudendo di botto il rubinetto, l'acqua non può fermarsi all'istante, e va ad urtare contro il rubinetto, formando il così detto *colpo d'ariete*.

L'autoinduzione pertanto ha per effetto di attenuare le brusche variazioni d'intensità della corrente nel circuito; quest'effetto è paragonabile a quello di un volano di una macchina, per l'inerzia del quale sono impedite le brusche variazioni di velocità. In conclusione adunque si può dire che: *l'autoinduzione esprime per la corrente elettrica, ciò che l'inerzia esprime per i corpi in moto.*

Non si pensi che l'energia sottratta alla chiusura e quella generata all'apertura del circuito, per formare le extracorrenti, avvenga senza intervento di altra energia; anche ora viene applicato il principio della trasformazione dell'energia. Infatti, alla chiusura del circuito, si deve generare attorno a questo un flusso di forza a spese della corrente medesima, che così viene indebolita; il flusso generato, poi al momento dell'apertura non si distrugge, ma annullandosi genera l'extracorrente di apertura.

324. **Induttanza.** — Ora, se i è l'intensità della corrente che circolando in un circuito produce un flusso φ, è manifestamente questo proporzionale alla corrente:

$$4) \qquad \varphi = L\,i\,,$$

in cui L è un coefficiente di proporzionalità, che si chiama il **coefficiente di autoinduzione o induttanza** del circuito. Esso dipende non solo dalle dimensioni (lunghezza, resistenza elettrica, ecc.) del circuito, ma anche dalla forma di questo; i rocchetti con nucleo di ferro hanno una grande induttanza, anche se formati con filo di rame di pochi ohm di resistenza; mentre il filamento di una lampadina ad incandescenza, che può avere la resistenza di un centinaio di ohm, ha un'induttanza trascurabile.

Dalla 4) si ricava: $L = 1$ per $\varphi = i = 1$; cioè *l'unità d'induttanza è quella di un circuito in cui l'unità di corrente genera un flusso unitario.* L'unità pratica d'induttanza si chiama **henry**; essa equivale a 10^9 (*u.e.m.*):

$$5) \qquad 1\ henry = 10^9\ (u.e.m.).$$

Poichè per la legge di Neumann è: $e = \frac{\varphi}{t}$, la 4) si può anche scrivere:

$$6) \qquad e = \frac{L\,i}{t}\,;$$

per la quale potremo anche dire che:

l'henry è l'induttanza di quel circuito, nel quale la variazione di corrente di 1 amp. per secondo, produce la f.e.m. di 1 volt.

Ricavando L dalla 6) abbiamo:

$$7) \qquad L = \frac{e\,t}{i}\,,$$

nella quale esprimendo e in *volt*, i in *ampère*, t in secondi, rimane L espressa in *henry*.

Si può mettere in evidenza l'effetto dell'autoinduzione con una semplice esperienza. Si inserisce nel circuito di una pila un'elettrocalamita E (di forte induttanza) ed una lima L (Fig. 482); su questa si fa strisciare la punta di un filo di metallo M, facente parte del circuito. Per la scabrosità della lima, si formano tra filo e lima numerose interruzioni di corrente e perciò nel punto di contatto numerose e brillanti scintilline. Togliendo l'elettrocalamita, cioè diminuendo l'induttanza del circuito, queste scintille si attenuano; sebbene per l'esclusione della resistenza dell'elettrocalamita, l'intensità della corrente sia aumentata.

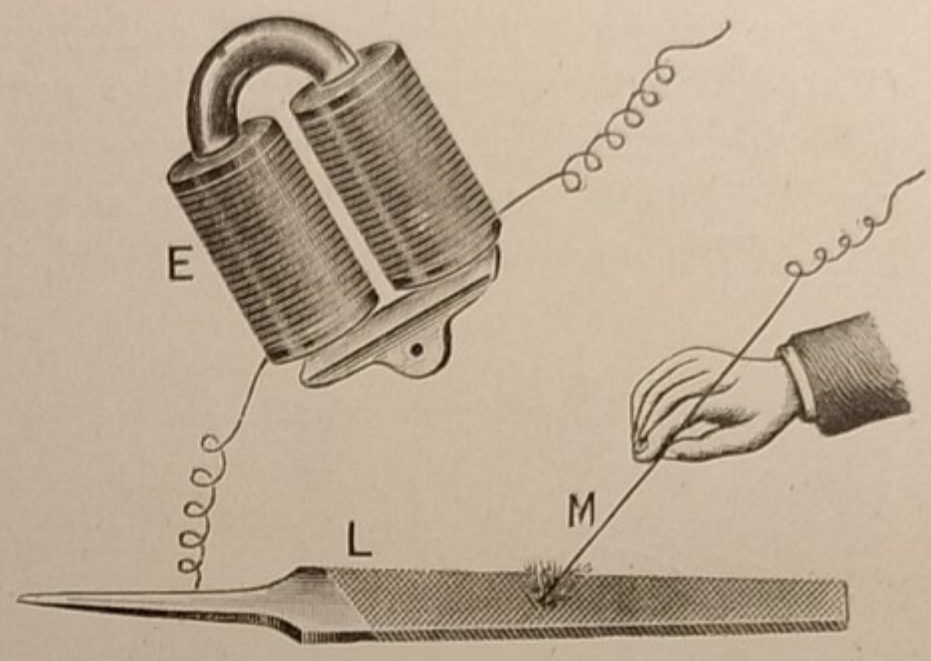


Fig. 482.

Queste scintille di apertura si osservano in ogni punto in cui s'interrompe un circuito; come, ad es., dentro gli interruttori delle lampade elettriche, fra la rotella e il filo aereo di un tram, ecc. Esse ossidano i metalli fra cui si producono; perciò negli apparecchi, come il campanello elettrico, in cui le interruzioni avvengono molte volte, si suole mettere un pezzettino di platino o di argento nel punto in cui avviene l'interruzione.

325. **Rocchetto di Ruhmkorff.** — Le leggi dell'induzione hanno applicazione immediata nel **rocchetto di Ruhmkorff** [1], che si chiama anche

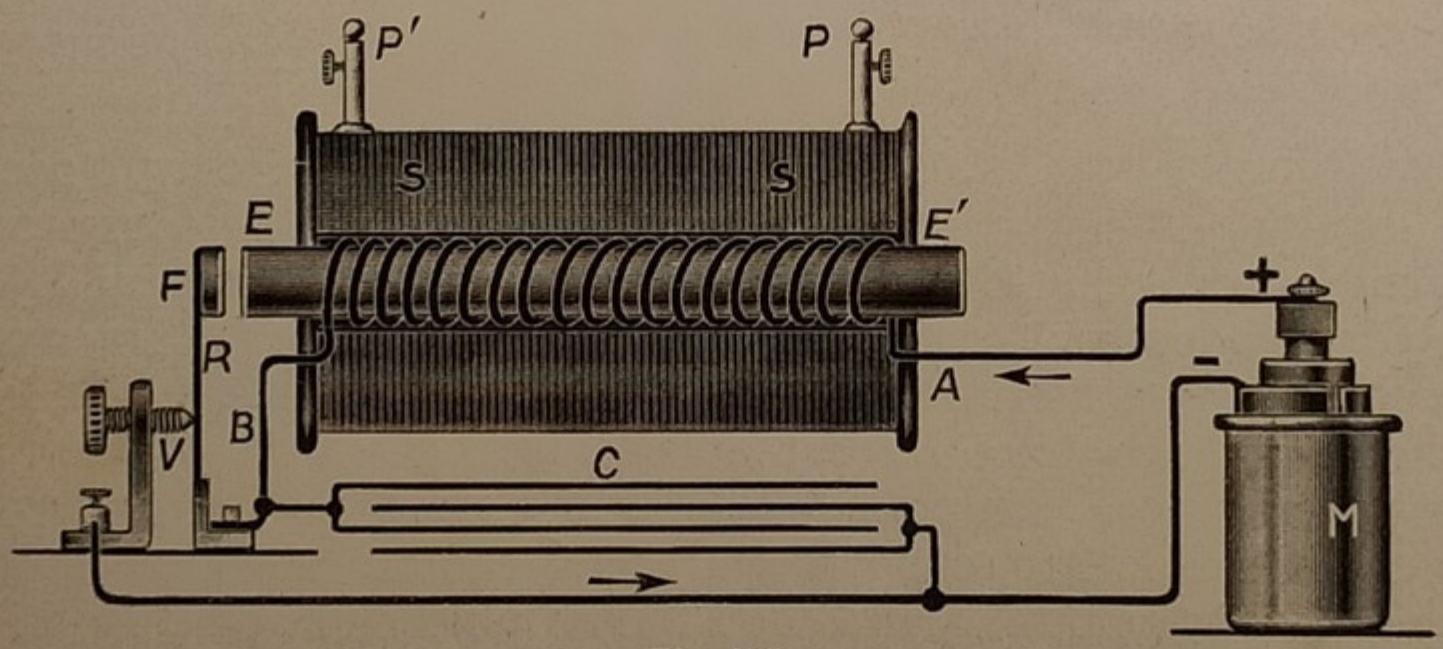


Fig. 483.

rocchetto d'induzione; esso serve a trasformare la corrente della pila a basso potenziale, in corrente ad alto potenziale capace di dare lunghe scintille. Questo apparecchio è interessante anche per il fatto che serve a dimostrare l'identità tra l'elettricità delle pile e quella delle macchine elettrostatiche. La differenza sta solo in questo: le macchine elettrostatiche producono elettricità ad altissimo potenziale, ma in minima quantità; le scintille ottenute con esse, sono da paragonarsi a *gocce d'acqua che cadono con*

(1) Ruhmkorff Heinrich; n. a Hannover nel 1803, m. a Parigi nel 1877.

violenza da una nuvola alta. Invece le pile dànno elettricità a basso potenziale ma in enorme quantità; la loro corrente è da paragonarsi *all'acqua che scorre in un fiume.*

Il *rocchetto di Ruhmkorff* è formato da un nucleo di ferro dolce EE' (Fig. 483 schematica), costituito solitamente di un fascio di fili di ferro, per ridurre le correnti di Foucault, che si producono nei conduttori massicci (§ 322). Attorno al nucleo è avvolto un rocchetto di filo di rame isolato AB, grosso ed in pochi strati, formante il circuito primario. Attorno a questo vi è un secondo rocchetto SS, isolato dal primo, formato con filo di rame sottile e quindi di moltissime spire, in modo da avere una grande lunghezza (addirittura parecchie decine di chilometri). Esso costituisce il circuito secondario; i suoi capi comunicano con due elettrodi P e P' che sono *i poli del rocchetto*, e fra i quali scoccano le scintille.

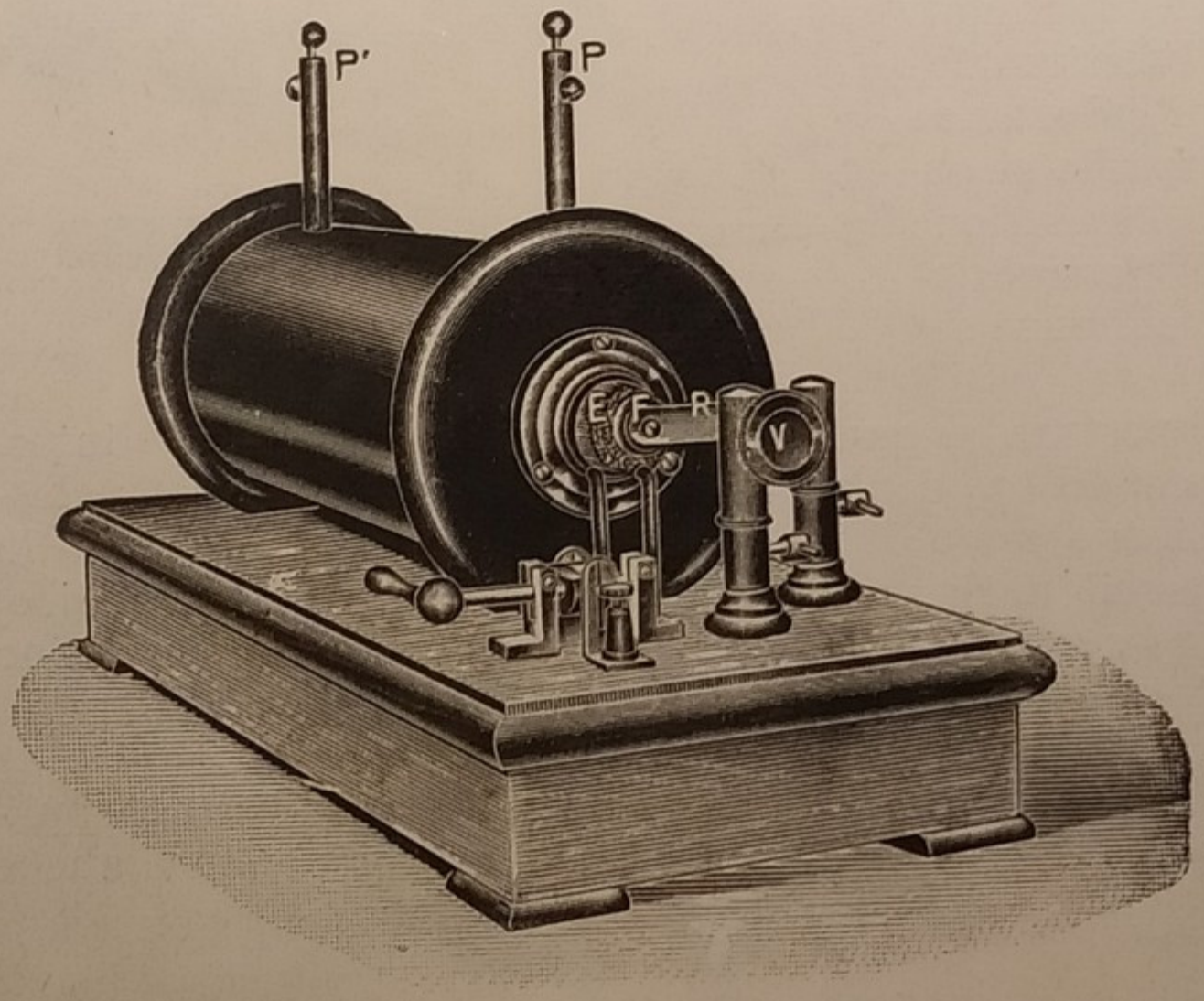


Fig. 484.

Poichè l'induzione avviene solo nei momenti della chiusura e dell'apertura del circuito, occorre che queste si producano in gran numero per minuto secondo. Ciò non può farsi con un interruttore comune, da manovrarsi a mano; ma occorre un **interruttore automatico.** Nei piccoli rocchetti si adopera **l'interruttore a martello,** che è formato da un dischetto di ferro dolce F, sostenuto da una molla R, contro cui poggia la punta di una vite V. Un polo della pila M è congiunto con un capo A del circuito primario, l'altro capo B del quale comunica con la molla R; la vite V è messa in comunicazione con l'altro polo della pila. Così il circuito è chiuso, il nucleo EE' si magnetizza ed attira il dischetto F, la molla R si piega e si scosta dalla vite V; non essendovi allora più il contatto, ivi si interrompe il circuito. Ma allora il nucleo si smagnetizza, non attira più F, la molla R torna indietro e tocca nuovamente V, richiudendo il circuito. E così di seguito, rapidamente; la molla R si mette a vibrare, chiudendo e aprendo il circuito, molte volte al minuto secondo. Contemporaneamente si destano nel secondario correnti indotte, la cui *f.e.m.* è approssimativamente con quella della corrente primaria nello stesso rapporto che vi è tra il numero delle spire del secondario e quelle del primario. Poichè il numero delle spire del secondario è grandissimo, la corrente indotta è ad altissimo potenziale; capace cioè di produrre lunghe scintille.

Tra la punta della vite V e la molla R, ove s'interrompe la corrente, si forma ad ogni interruzione una scintilla di extracorrente (§ 324). Essa consuma intanto il metallo, per quanto in quel punto nella vite e nella molla si innesti un pezzettino di platino, inossidabile e meno volatilizzabile; inoltre il passaggio di elettricità con la scintilla, costituisce un prolungamento del tempo in cui avviene l'interruzione; quindi, per la legge di Neumann, si abbassa la *f.e.m.* della corrente indotta. Per queste ragioni questa scintilla è dannosa ed occorre evitarla o attenuarla.

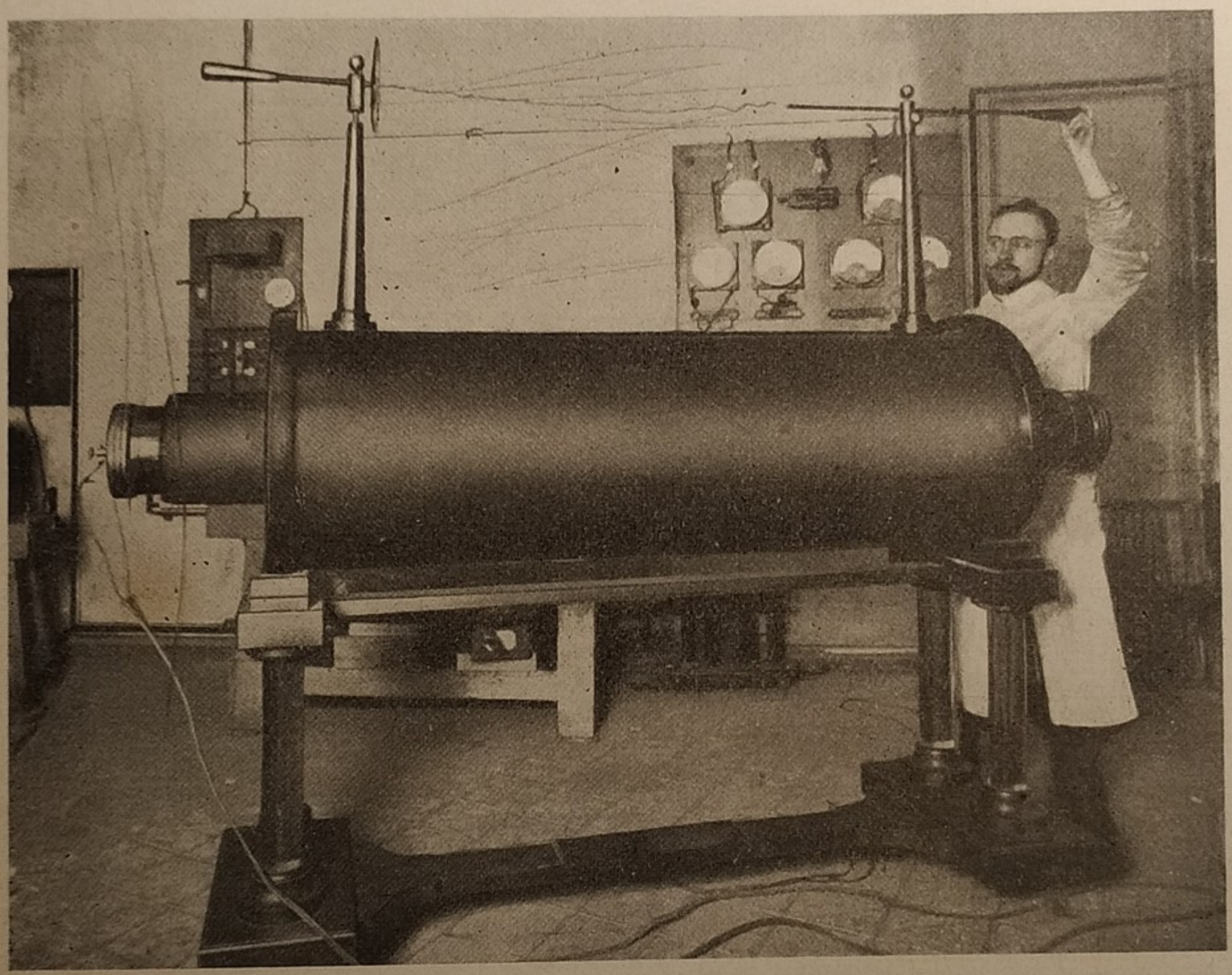


Fig. 485

Ciò si ottiene inserendo in derivazione tra la molla e la vite, un condensatore (§ 189) di grande capacità, rappresentato schematicamente in C nella Fig. 483, esso è formato da molti fogli di carta imbevuta di vernice isolante, sulle cui facce sono applicati dei fogli di stagnola; tutti i fogli di stagnola che sono da una parte di quelli di carta, sono riuniti fra loro e formano una delle armature, gli altri fogli della parte opposta, pure riuniti fra loro, formano l'altra armatura; tutto insieme ha l'aspetto di un libro.

Al momento della interruzione, l'elettricità che produrrebbe la scintilla d'extracorrente, va in massima parte a caricare questo condensatore, e la scintilla non si forma; il condensatore carico si scarica nel primario attraverso la pila, e vi invia un impulso di corrente di senso contrario a quella

della pila, che smagnetizza più rapidamente il nucleo, il quale per isteresi (§ 302) ritarderebbe a smagnetizzarsi. L'esperienza prova che l'aggiunta del condensatore migliora assai il funzionamento del rocchetto.

La Fig. 484 mostra in prospettiva un rocchetto di media potenza; l'interruttore è nella parte anteriore; il condensatore è contenuto nella scatola che fa da zoccolo al rocchetto. Se ne fanno di quelli che possono produrre più di un metro di scintilla (Fig. 485); ma in questo caso anche col condensatore la scintilla d'extracorrente è così forte che deteriorerebbe presto i contatti dell'interruttore. Si usano allora interruttori a mercurio, nei quali l'interruzione avviene tra la punta di un'asticella di ferro e il mercurio contenuto in un bicchierino; sul mercurio si pone alcool o petrolio, perchè la scintilla avvenga dentro un liquido isolante, che la smorza. L'asticella di ferro è spesso manovrata da un piccolo motore elettrico.

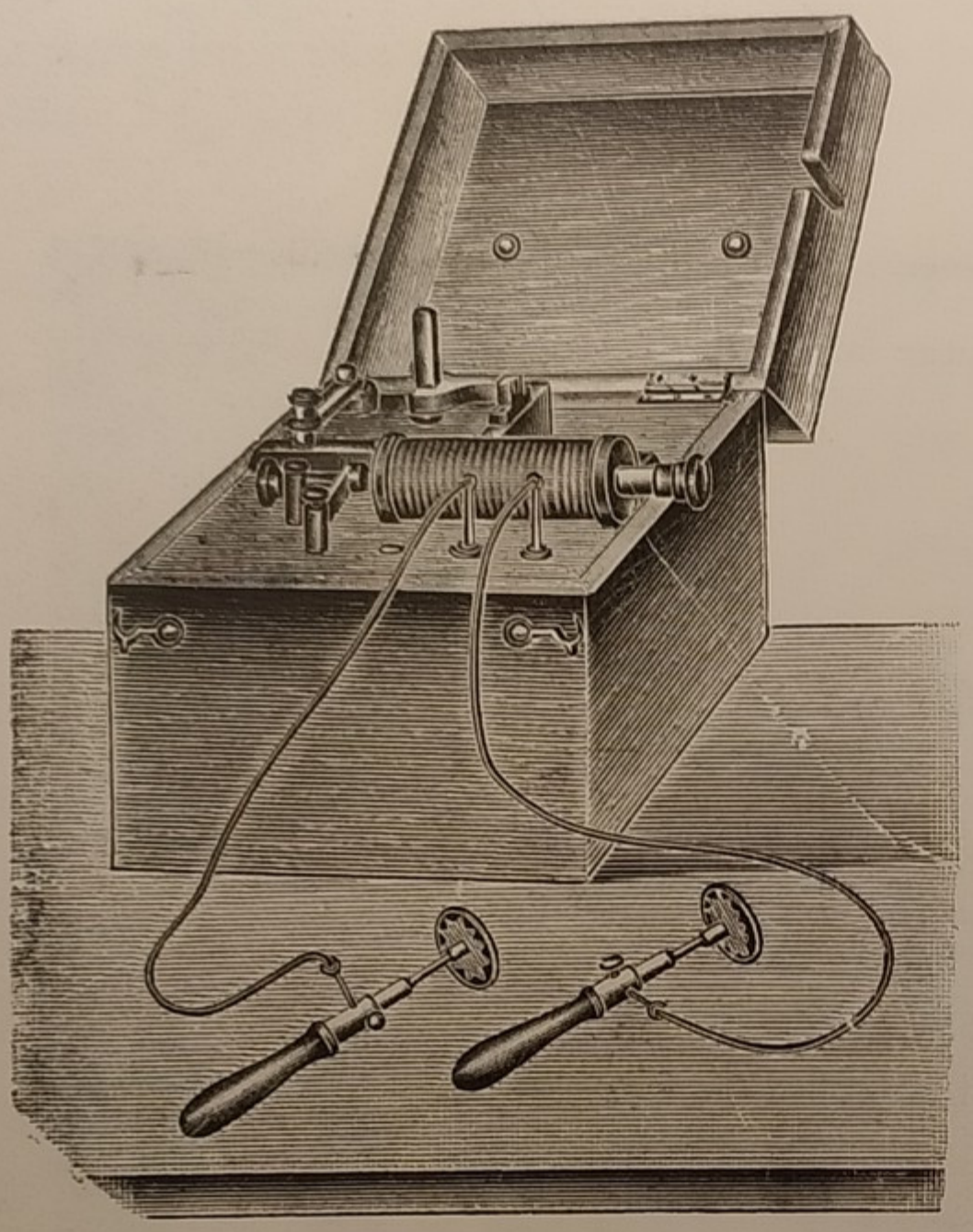


Fig. 486.

Ricordando che le correnti indotte di apertura e di chiusura sono di senso contrario, le scariche prodotte dal rocchetto avvengono in senso alternativo; e ciascuno dei poli P e P' è alternativamente $+$ e $-$. Ma abbiamo visto che per l'autoinduzione la corrente inducente alla chiusura del circuito è più debole che all'apertura; onde anche la corrente indotta di chiusura è di *f.e.m.* notevolmente minore di quella d'apertura. Se quindi tra gli elettrodi P e P' vi è una distanza tale che appena vi passano le scariche, passano solo quelle dovute all'apertura; cioè si può ritenere che passi elettricità in un senso solo. Perciò comunemente potremo considerare nel rocchetto uno degli elettrodi come polo $+$ e l'altro come polo $-$.

Col rocchetto di Ruhmkorff si riesce ad ottenere scariche con maggiore frequenza, con maggiore quantità di elettricità ed assai più comodamente che con le macchine elettrostatiche; quindi preferiamo ricorrere al rocchetto allorchè si richiede l'uso di elettricità ad alto potenziale.

La Fig. 486 mostra un piccolo rocchetto d'induzione usato in medicina, allorchè sia utile dare una leggera scossa a muscoli paralizzati (§ 201). Il rocchetto è disposto in una cassetta contenente anche la pila che serve a farlo funzionare; la scossa si dà per mezzo dei due *elettrodi* che si vedono davanti alla cassetta. Queste correnti indotte si chiamano nella pratica medicale **correnti faradiche.**

Problemi da risolvere.

1. Un rocchetto inducente, del diametro di cm. 6, senza nucleo, è composto di 100 spire, ed è lungo cm. 12; vi passa una corrente di 8 *amp*. S'introduce in un decimo di secondo in un rocchetto indotto di eguale lunghezza, del diametro di cm. 7, con 850 spire. Calcolare la *f.e.m.* della corrente indotta.

2. In quanto tempo si deve allontanare un rocchetto inducente delle dimensioni del problema precedente, ma con nucleo la cui permeabilità è di 1200 unità, per ottenere una corrente indotta di 8 *V* in un rocchetto indotto di 500 spire?

3. Calcolare la intensità della corrente indotta in un conduttore rettilineo di cm. 10 di lunghezza, disposto in un campo uniforme dell'intensità di 5000 *gauss*, che si sposti in direzione perpendicolare alla sua lunghezza, con la velocità di m. 8 al secondo, se esso fa parte di un circuito della resistenza totale di 16 *ohm*.

4. In un circuito la cui induttanza è di 0,75 *henry*, l'intensità della corrente varia da 10 *amp*. a 0 in mezzo secondo. Calcolare il valore della *f.e.m.* indotta.

5. Calcolare l'induttanza del rocchetto del problema 1.

Telefono.

326. **Il telefono** è un apparecchio che serve a trasmettere i suoni a distanza, e in particolare la parola, per mezzo dell'elettricità.

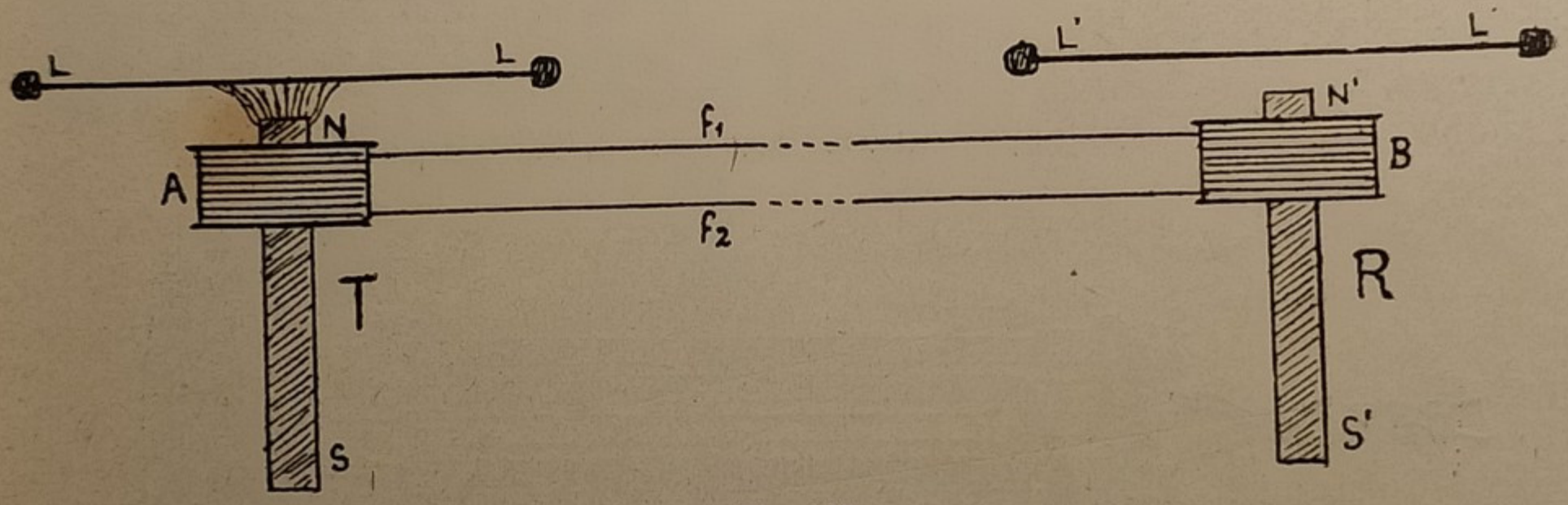


Fig. 487.

Il primo apparecchio fu ideato dall'italiano Meucci [1] nel 1849; ma questi non ebbe i mezzi per diffondere ed applicare la sua invenzione. Ciò fu fatto nel 1877 dall'americano Bell [2], di cui il telefono porta il nome.

Il **telefono Bell** è fondato sul seguente principio:

Supponiamo di avere in T (Fig. 487) una calamita permanente NS, un polo della quale è circondato da un rocchettino A di filo di rame isolato. Vicino al polo N, ma senza toccarlo, è posta, sostenuta solo all'orlo, una lamina LL di sottile ferro dolce, quindi flessibile. Parliamo avanti alla lamina L; è noto che la causa fisica del suono è la vibrazione (Vol. 1° - § 354), quindi la voce è dovuta alle vibrazioni dell'aria che esce dalla nostra bocca; vibrazioni che si modificano ad ogni istante per numero e per forma, secondo le modulazioni della voce. Queste vibrazioni si comunicano alla

---

(1) Meucci Antonio; n. a Firenze nel 1808, m. a Clifton, presso New-York, ne 1889.
(2) Bell A. Graham; n. a Edimburgo nel 1847, m. nel 1922.

lamina L che si mette a sua volta a vibrare; con ciò essa si avvicina o si allontana dal polo magnetico N.

Ricordiamo (§ 147) che dal polo N escono le linee di forza, che per la permeabilità della lamina si dirigono e raccolgono dentro di questa; il movimento della lamina trascina seco l'insieme di queste linee di forza invisibili, ora spingendole dentro il rocchetto A, ora trascinandole fuori di questo. Onde il flusso di forza che attraversa il rocchetto A, varia ad ogni istante col vibrare della lamina. Si formano perciò in A, per la legge di Neumann, delle correnti indotte alternative, che sono (per così dire), la traduzione elettrica delle vibrazioni della lamina.

Tali correnti, per mezzo di due fili conduttori $f_1 f_2$, si propagano nel rocchetto B di un altro apparecchio lontano R, identico al precedente, che ora funziona da ricevitore. Qui il nucleo $N'S'$, circondato dal rocchetto B, forma un'elettrocalamita; le correnti alternate che arrivano in B formano secondo il senso, ora un polo Nord ora un polo Sud in N', il quale, componendosi col polo ivi esistente, ora lo rinforza ora lo indebolisce. Si ha così in N' un polo di intensità variabile, che ora attira più, ora, meno la lamina L', e questa si mette a vibrare *in modo identico* a quella del trasmettitore T; si riproduce così il suono, che si ascolta accostando l'orecchio all'apparecchio.

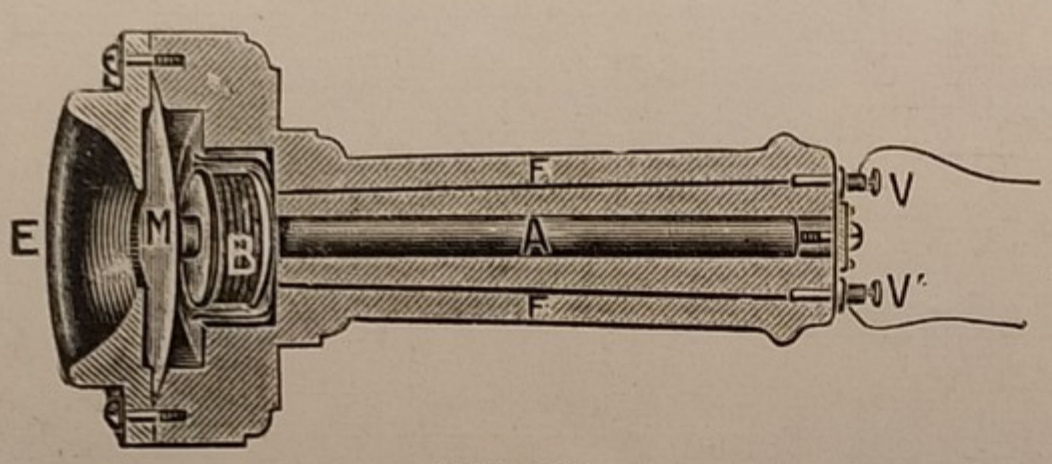


Fig. 488.

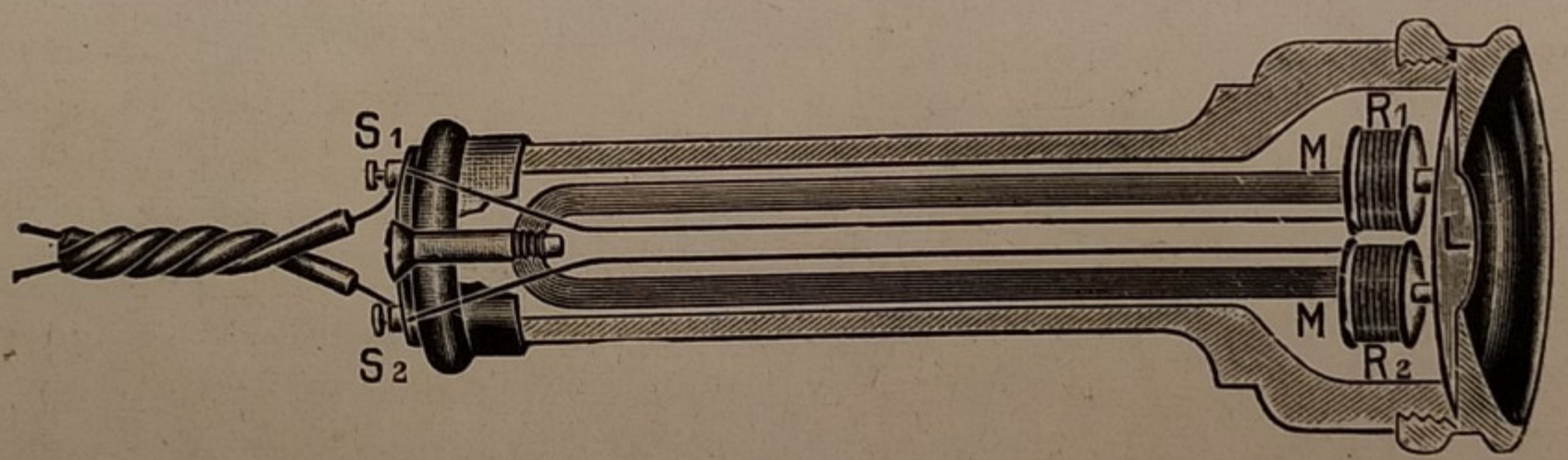


Fig. 489.

La Fig. 488 mostra come era fatto uno dei primi telefoni Bell; in seguito fu migliorato adoperando una calamita a ferro di cavallo MM (Fig. 489), entrambi i poli della quale sono circondati da rocchetti $R_1 R_2$, collegati insieme in modo da formare un unico circuito.

L'energia meccanica messa in giuoco nel trasmettitore di questo telefono è cosa minima: si tratta del movimento di qualche grammo di ferro (la lamina L) per un tratto di qualche centesimo di millimetro. Le correnti indotte che si formano in A (Fig. 487) sono quindi estremamente deboli; tanto che nessuno strumento potrebbe misurarle. Onde, per la resistenza della linea $f_1 f_2$ che le trasmette indebolendosi ancora più, non possono arrivare molto lontano; cioè con questo sistema non si riesce a trasmettere i suoni che debolmente ed a poche decine di metri.

327. **Microfono.** — Hugues nel 1878 inventò un trasmettitore più potente, che chiamò il **microfono.**

Nella forma originaria, ora non più adoperata, esso è composto da una bacchetta di carbone B (Fig. 490) lunga qualche centimetro, affusolata alle estremità, alle quali è leggermente sostenuta da due blocchetti di carbone CC', fissati su una tavoletta di sostegno. Il contatto è così leggero, che la bacchettina B non è immobilizzata dai blocchetti, ma può alquanto muoversi fra questi. Tutto l'apparecchio è inserito in un circuito che comprende una pila P di pochi *volt* ed un telefono ricevitore T.

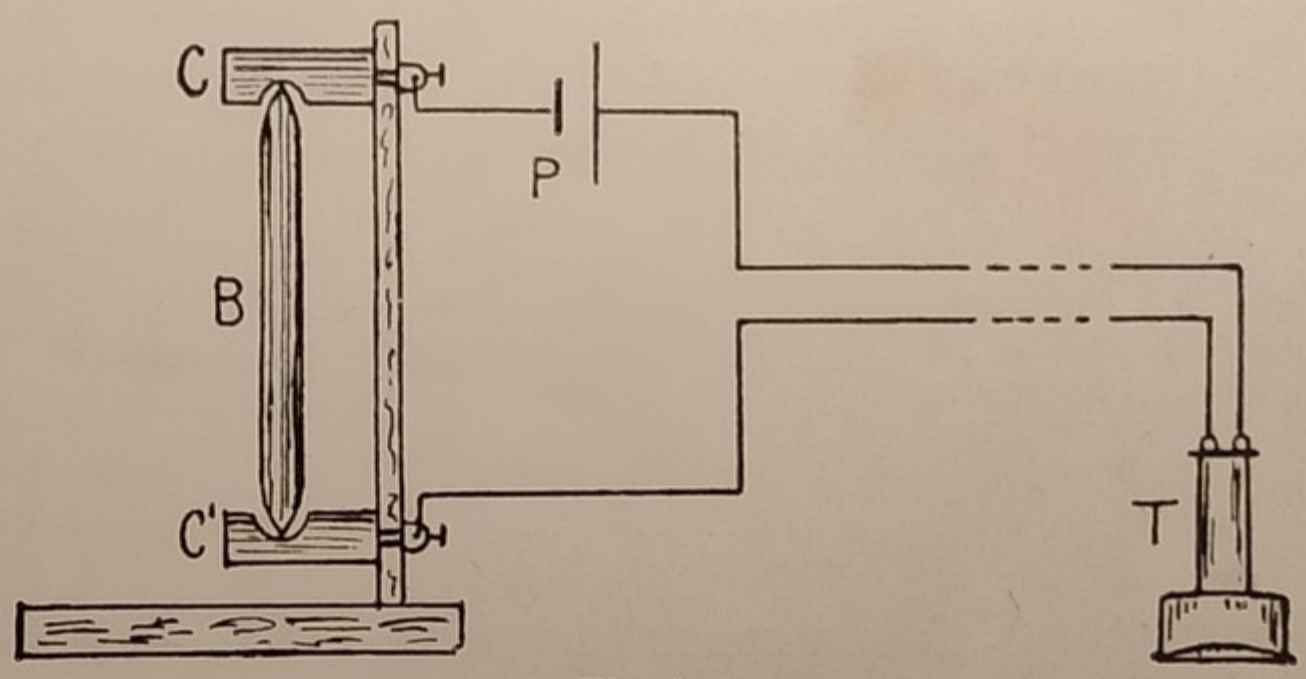


Fig. 490.

Il circuito è apparentemente chiuso; ma nel leggero, imperfetto contatto fra la bacchettina ed i blocchetti, vi è tanta resistenza elettrica, che la corrente trasmessa è pressochè nulla. Se ora si parla avanti al microfono, le vibrazioni sonore si trasmettono alla bacchetta di carbone, che si mette a vibrare; allora essa preme ora più, ora meno, contro i blocchetti che la sostengono; varia in tal modo la resistenza elettrica dei contatti e si trasmette al ricevitore una corrente d'intensità variabile, che provoca la vibrazione della lamina del telefono T e si riproduce il suono. L'energia messa in giuoco ora è quella di una pila e quindi la trasmissione del suono avviene più lontano e con maggiore intensità. Suoni debolissimi sono così uditi chiaramente; si trasmette benissimo il tic-tac di un orologio da tasca posto sulla tavoletta del microfono e si sente perfino il camminare di una mosca su tale tavoletta.

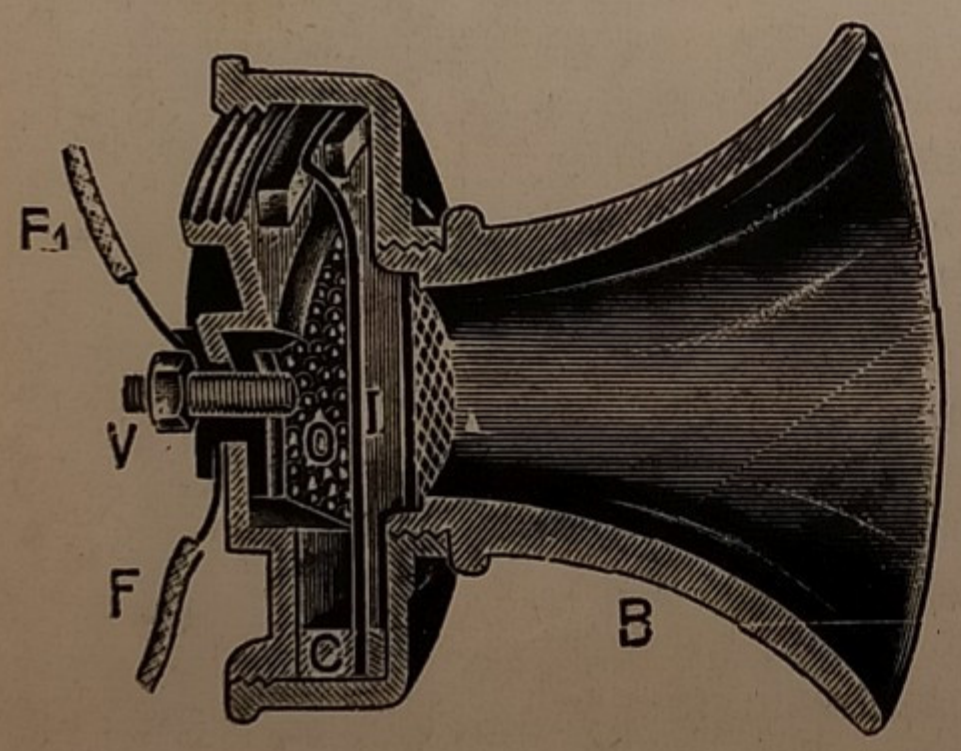


Fig. 491.

Oggi non si adoperano più i microfoni a bacchetta, che sono di funzionamento irregolare ed allo stato di riposo fanno passare ancora troppa corrente, in modo che la pila si esaurisce in poco tempo. Un microfono più adoperato è rappresentato nella Fig. 491: la corrente della pila è trasmessa da una laminetta I ad una vite V, attraverso granelli di carbone O racchiusi in apposita scatoletta; il suono prodotto avanti all'imboccatura B provoca la vibrazione della laminetta I e scuote i granuli O, in modo da far variare la resistenza elettrica di tutta la massa granulare, raggiungendo meglio lo scopo del microfono precedente.

328. **Microfono con rocchetto.** — Allorchè la distanza tra microfono e ricevitore è di qualche chilometro, neanche il sistema descritto è sufficiente alla trasmissione chiara della parola; la pila P non deve superare i 4 *volt*, altrimenti il principio del contatto imperfetto al microfono non vale più, e la corrente passa con continuità attraverso i granelli di carbone; ora, con soli 4 *volt* non si può spingere la corrente troppo lontano. Inoltre, la resistenza elettrica della linea di trasmissione diventa così grande, che rispetto ad essa diventano trascurabili le variazioni di resistenza del microfono, e la corrente trasmessa non è sufficientemente variabile.

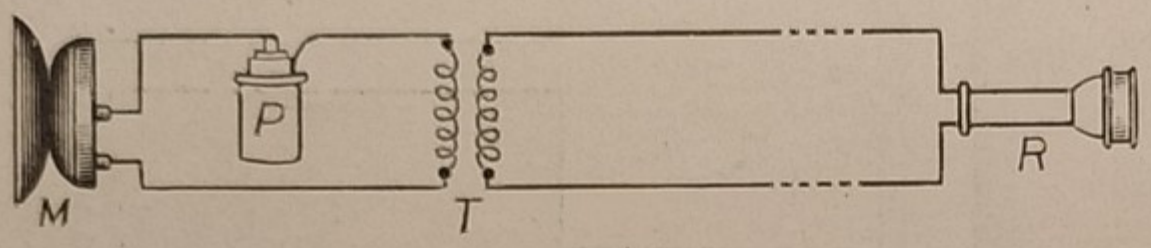


Fig. 492.

Si può rimediare a questi inconvenienti con la disposizione della Fig. 492: il microfono M è inserito in un circuito che comprende il primario di un piccolo rocchetto d'induzione T (senza interruttore), il cui secondario è messo in comunicazione col ricevitore R. Parlando avanti al microfono, la corrente variabile da questo trasmessa provoca nel secondario del rocchetto una corrente variabile della stessa forma, ma di più alto potenziale, suscettibile quindi di andare lontano. Inoltre, la resistenza della linea non ha ora grande influenza rispetto alla resistenza, anch'essa grande, del secondario.

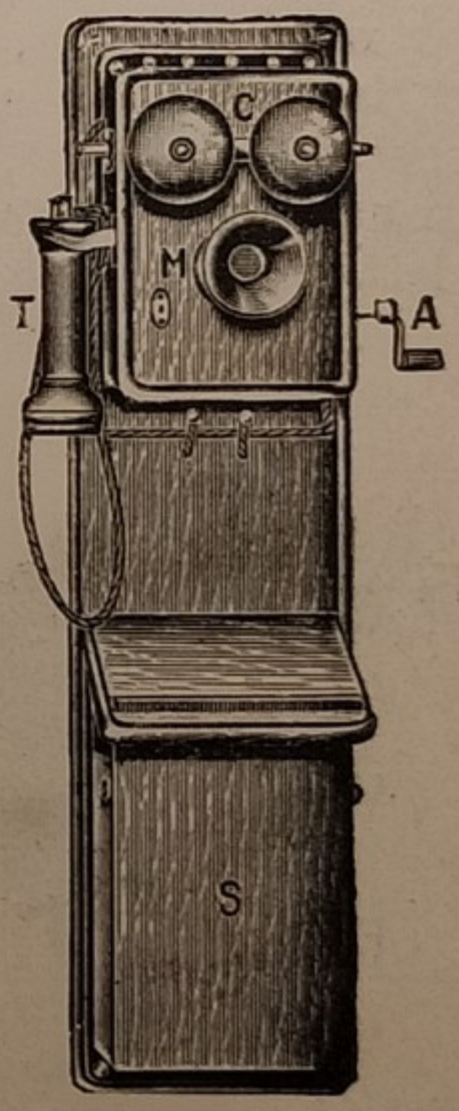


Fig. 493.

La Fig. 493 mostra una posta telefonica da parete, adoperata comunemente: M è l'imbuto del microfono avanti a cui si parla; T è il ricevitore; S è una scatoletta contenente le pile necessarie per il funzionamento del microfono; C è la suoneria con cui siamo chiamati; A una manovella, girando la quale si mette in moto una piccola macchinetta magneto-elettrica (§ 333) posta nell'interno, che fornisce una corrente della tensione di un centinaio di *volt*, capace di far funzionare la suoneria dell'altra stazione con cui si vuol parlare; per tale chiamata non è sufficiente la pila del microfono che, abbiamo detto, è di pochi *volt*. La medesima linea serve tanto per trasmettere la corrente di chiamata, quanto quella del microfono; per questo agisce automaticamente un commutatore, che funziona per il peso del ricevitore T. Il gancio a cui è attaccato il ricevitore è all'estremità di una leva mobile; finchè vi è attaccato il ricevitore, il peso di questo abbassa la leva e si forma un contatto che stabilisce la comunicazione della linea con la suoneria; allorchè si stacca il ricevitore per accostarlo all'orecchio, la leva viene sollevata da una molla, si apre il contatto precedente, e se ne forma un altro che stabilisce la comunicazione della linea col ricevitore.

329. **Centrale telefonica.** — In un impianto telefonico per città, ogni *abbonato* è contrassegnato da un numero, ed ha una linea sua particolare, che termina alla **centrale telefonica** della città, ad una delle tante caselle

di un **quadro di commutazione** (Fig. 494), portante un cartellino con il numero dell'abbonato. Allorchè un abbonato *A* vuol parlare con un altro *B*, gira la monovella del suo apparecchio; con questo parte una corrente che accende alla centrale una lampadina nella casella corrispondente e illumina il numero relativo; una *signorina telefonista* che sta sempre avanti al quadro, legge così il numero dell'abbonato *A* ed infilando *una spina* in un foro della parte inferiore del quadro, che porta il numero

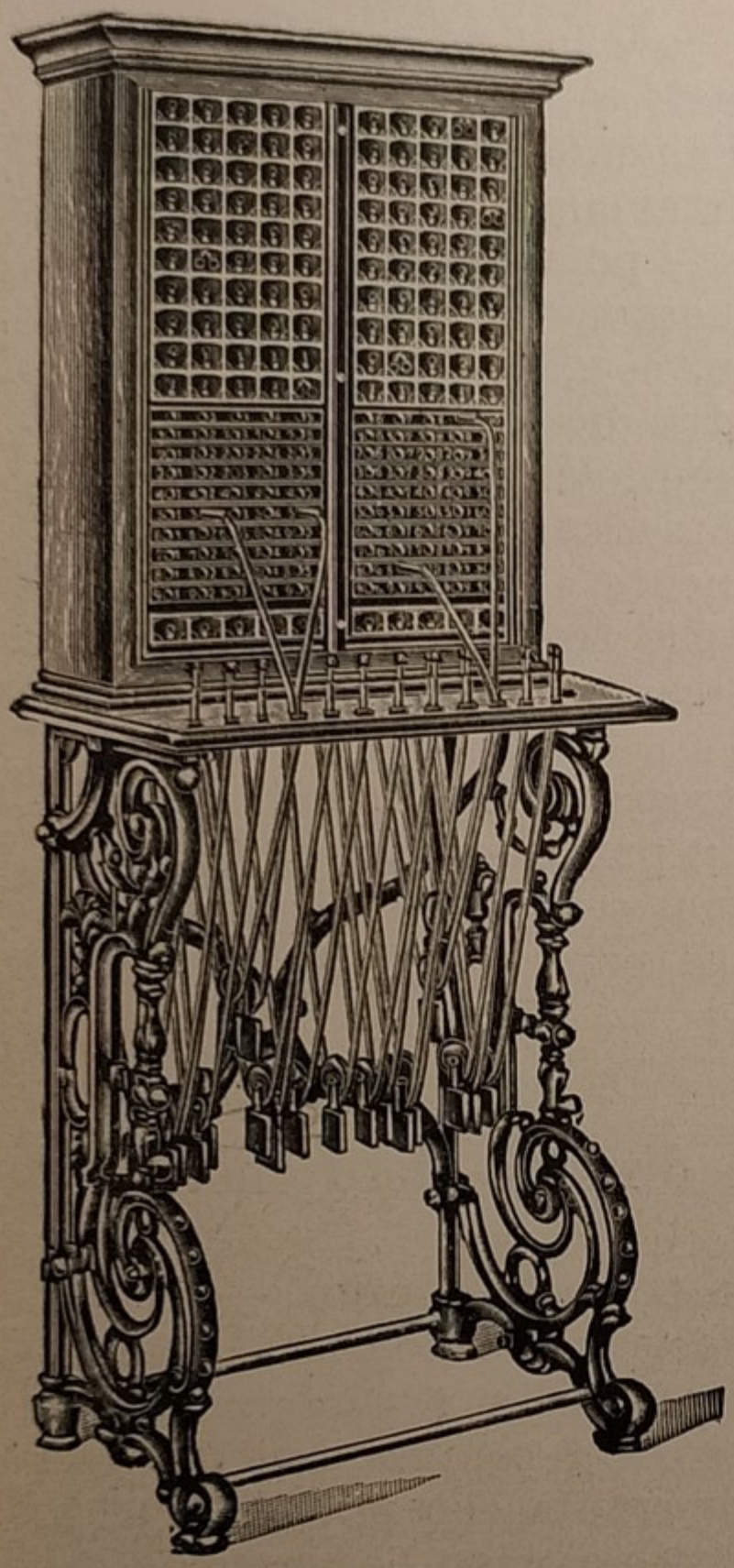


Fig. 494.

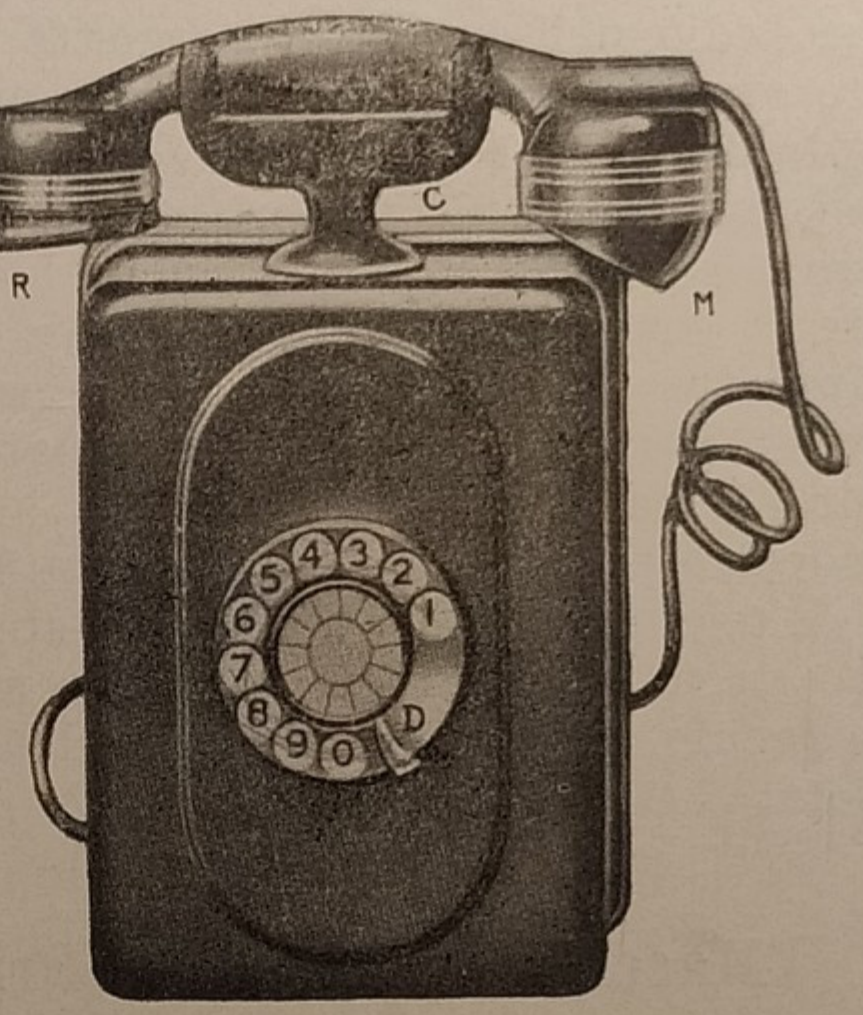


Fig. 495.

dell'abbonato *A*, si mette in comunicazione con questi e ascolta con quale altro numero vuole comunicare; avutolo, mette in comunicazione, con uno dei cordoncini che pendono sotto il tavolino del quadro, il foro corrispondente all'abbonato *A* con quello corrispondente dell'abbonato *B*, e le due stazioni sono in comunicazione; contemporaneamente manda una corrente nella linea di *B* per far suonare il campanello nell'apparecchio di questi; *B* corre al telefono, stacca il suo ricevitore dal gancio e può iniziare la conversazione.

Da qualche anno sono in funzione nelle grandi città i **telefoni automatici**, nei quali non occorre più la telefonista per stabilire la comunicazione tra due abbonati. L'apparecchio porta un disco girevole (Fig. 495) con dieci fori, dietro ai quali si vedono le dieci cifre da 1 a 0; l'abbonato *A* infilando l'estremità di un dito in un foro di questo disco, lo fa girare ogni volta sino ad un arresto *D*, per tutte le cifre del numero che corrisponde all'abbonato *B*. Se, ad es., questo numero è 43-516, infila il dito nel foro 4 e gira il disco finchè si arresta; toglie il dito e il disco ritorna indietro al punto di partenza; infila il dito nel foro 3 e gira nuovamente il disco, ecc.; quando ha girato per le 5 cifre del numero, è stabilita automaticamente la comuni-

cazione tra A e B. Naturalmente non possiamo qui spiegare come ciò avvenga.

Nella Fig. 495 la scatoletta R contiene il ricevitore e si accosta all'orecchio, M contiene il microfono e viene vicino alla bocca; C è un sostegno oscillante che fa da commutatore.

Oggi, com'è noto, il telefono è una delle cose indispensabili della vita moderna; esso permette non solo di trasmettere ordini, trattare affari, avvisare persone interessate da un punto all'altro della città; ma permette di chiamare con urgenza il medico presso l'ammalato, fa venire una vettura di piazza se occorre per una corsa, avvisa i pompieri se si è sviluppato un incendio nella casa, ci permette di prenotare un posto al teatro, di essere svegliati la mattina ad ora prefissata, ecc., ecc. Oltre a ciò sono altrettanto facili le comunicazioni non solo tra due città della stessa Nazione; ma con gli ultimi perfezionamenti si può telefonare, seduti comodamente nel proprio studio, fin nella lontana America: pensate, col semplice girare di un disco, potete ascoltare chiaramente e riconoscere con tutte le sfumature, la nota voce di un parente, che trovasi a New-York o a Buenos-Ayres! Chi avrebbe mai potuto immaginare una cosa simile, al tempo dei nostri nonni?

Vedremo presto come la scoperta del nostro sommo Marconi, permetta oggi di telefonare a qualunque distanza, in un punto qualsiasi della Terra, anche su un bastimento in mezzo all'Oceano, servendosi di un comune apparecchio telefonico, e senza alcun filo di comunicazione tra le due stazioni.

Macchine magneto-elettriche e dinamo-elettriche.

330. **Produzione della corrente elettrica col movimento.** — La corrente elettrica generata dalle pile costa moltissimo, e non sarebbe stato possibile usufruirne per le odierne applicazioni; basta accennare al fatto che una lampadina elettrica la cui luce oggi costa 5 centesimi all'ora, consumerebbe in pari tempo più di 5 lire se alimentata con pile. Ciò che ha permesso di ottenere elettricità a costo bassissimo, sono le **macchine magneto** e **dinamo-elettriche**, che trasformano l'energia meccanica in energia elettrica.

Il principio fondamentale su cui sono basate tali macchine è il seguente:

331. **Esperienza di Palmieri.** — Sia $A\,B\,C\,D$ una *spira* metallica, che possa ruotare con moto uniforme attorno ad un asse mm, in un campo magnetico generato dai poli $N\,S$ di una calamita, (Fig. 496). Nella posizione della figura, la spira è attraversata dal massimo numero di linee di forza, che vanno da N ad S; chiamiamo $+a$ il valore di questo flusso. Ruotando la spira di 90°, il suo piano diviene parallelo alle linee di forza, ed il flusso che *l'attraversa* diventa zero; il flusso è cioè *diminuito da* $+a$ a *zero*; quindi, per la legge di Neumann nella spira si forma una corrente indotta, in un certo senso.

Ruotando la spira da 90° a 180°, ritorna col suo piano perpendicolare alle linee di forza; ma queste invece di entrare da una faccia, entrano dal-

l'altra; il che equivale a dire che il flusso che attraversa la spira è di segno opposto al precedente ed avrà un valore $-a$. Il flusso allora è *diminuito da zero* a $-a$ e nella spira si forma una corrente indotta ancora nello stesso senso della precedente.

Ruotando la spira da 180° a 270°, il flusso ritorna al valore zero; cioè *cresce da* $-a$ a *zero*; si forma quindi nella spira una corrente indotta, ma di senso contrario a quella precedente.

Ruotando finalmente la spira da 270° a 360°, cioè compiendo il giro, il flusso *cresce da zero* a $+a$ e si forma ancora una corrente indotta nel senso di quella precedente da 180° a 270°.

Se dunque la spira ha un moto rotatorio continuo, è sede di una corrente indotta che cambia di senso ad ogni mezzo giro, e che si chiama perciò **corrente alternata.**

La *f.e.m.* di questa corrente non varia istantaneamente da zero al suo valore massimo raggiunto in un senso o nell'altro; ma varia gradualmente come è indicato nella Fig. 497, nella quale si sono prese come ascisse i tempi e come ordinate le *f.e.m.* corrispondenti. La curva rappresenta la corrente durante un giro della spira: il ramo sopra ad AC la corrente in un senso durante il primo mezzo giro, ed il ramo inferiore a CE la corrente di senso contrario nel mezzo giro seguente.

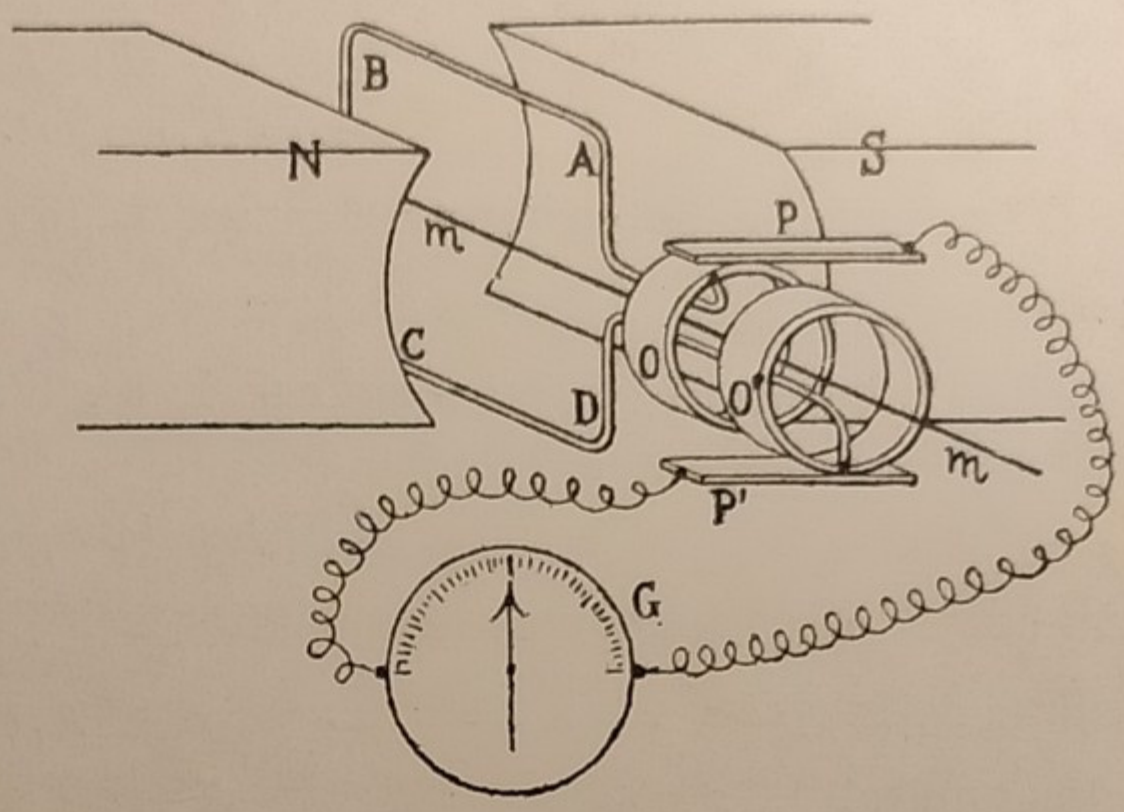


Fig. 496.

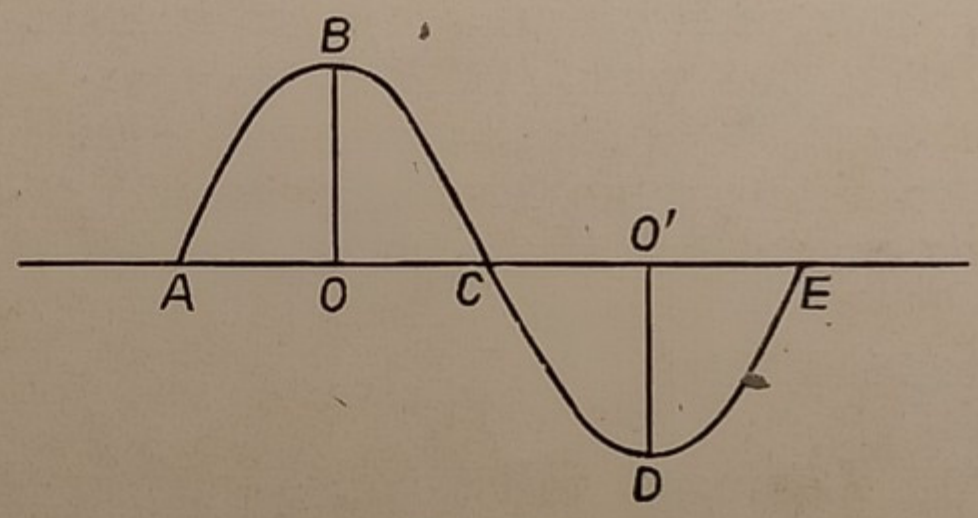


Fig. 497.

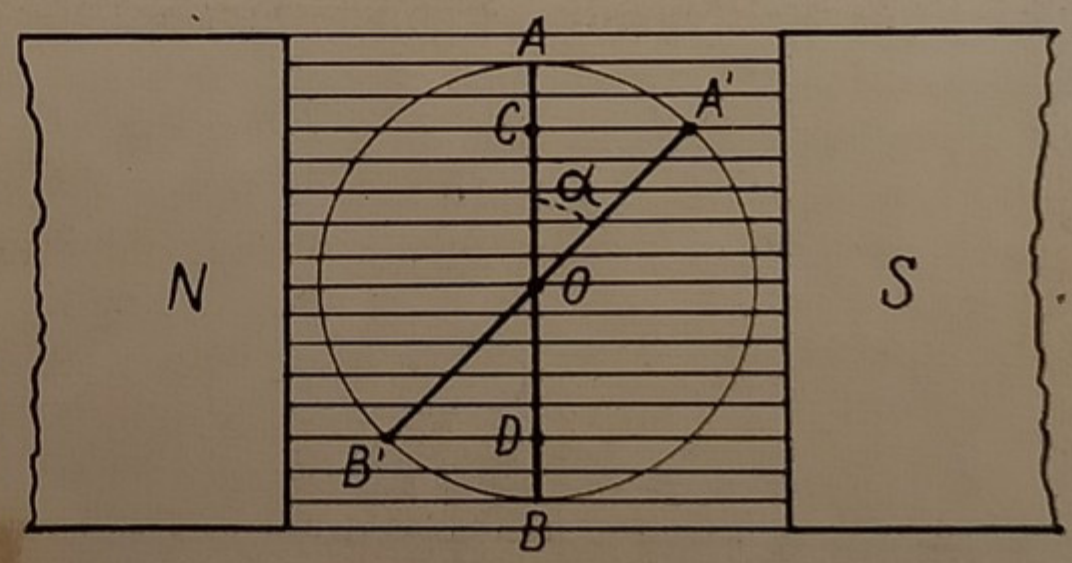


Fig. 498.

Se indichiamo con E_0 il valore massimo della *f.e.m.* durante la rotazione della spira, rappresentato da OB nella Fig. 497, ed α l'angolo che il piano della spira fa con un piano perpendicolare alle linee di forza (Fig. 498), si dimostra che per una posizione $A'B'$ qualsiasi della spira, la *f.e.m.* ha il valore:

$$1) \qquad e = E_0 \operatorname{sen} \alpha ; \qquad \text{cioè:}$$

la f.e.m. della corrente indotta è proporzionale al seno dell'angolo che il piano della spira fa con un piano prependicolare alla direzione del campo.

La curva della Fig. 497 è perciò la grafica della funzione 1), cioè è una **sinusoide.**

Se ω è la *velocità angolare* (Vol. 1° - § 45) della spira, e t il tempo in cui essa ha ruotato di α, è: $\alpha = \omega t$. La 1) allora si può scrivere:

$$2) \qquad e = E_0 \operatorname{sen} \omega t.$$

L'intensità della corrente al tempo t, dovrebbe essere per legge di Ohm, essendo R la resistenza del circuito: $i = \frac{e}{R} = \frac{E_0 \operatorname{sen} \omega t}{R}$. Ma per effetto dell'autoinduzione, la *f.e.m.* agente in quell'istante è minore di e. Il calcolo dimostra che il valore di i è dato dalla formula:

$$3) \qquad i = I_0 \operatorname{sen} (\omega t - \varphi),$$

in cui I_0 è il valore massimo dell'intensità della corrente durante la rotazione della spira, e φ è tale che: $\operatorname{tang} \varphi = \frac{\omega L}{R}$, essendo L l'induttanza della spira.

Per portare la corrente fuori della spira ed utilizzarla in un circuito esterno, basta unire i capi di essa spira con due anelli conduttori O ed O' (Fig. 496), montati sull'asse mm, isolati fra di loro e dall'asse; su tali anelli poggiano due molle P e P' dette **spazzole**, fisse, alle quali si uniscono i capi del circuito esterno. Ruotando la spira, e con essa i due anelli, dalle spazzole è raccolta la corrente alternata che si forma nella spira.

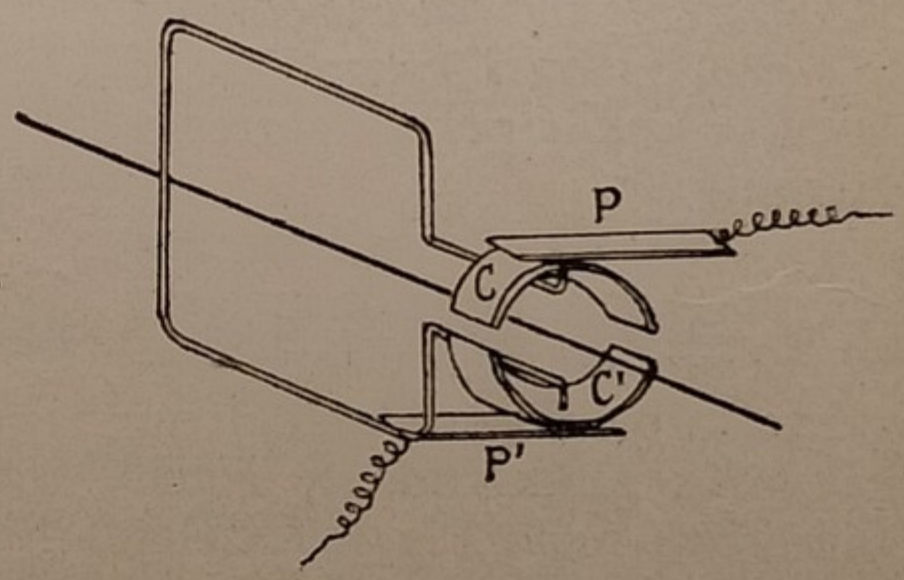


Fig. 499.

332. **Corrente pulsante.** — Se si vuole però nel circuito esterno **la corrente continua**, cioè sempre nel medesimo senso, si fa uso del **commutatore.** Invece che con due anelli, i capi della spira sono collegati con le due metà C e C' di uno stesso anello, isolate fra loro e dall'asse, (Fig. 499). Ad ogni mezzo giro s'inverte la corrente che si genera nella spira; ma contemporaneamente s'invertono anche i contatti dei due mezzi anelli con le spazzole, e da queste la corrente nel circuito esterno va sempre nel medesimo senso.

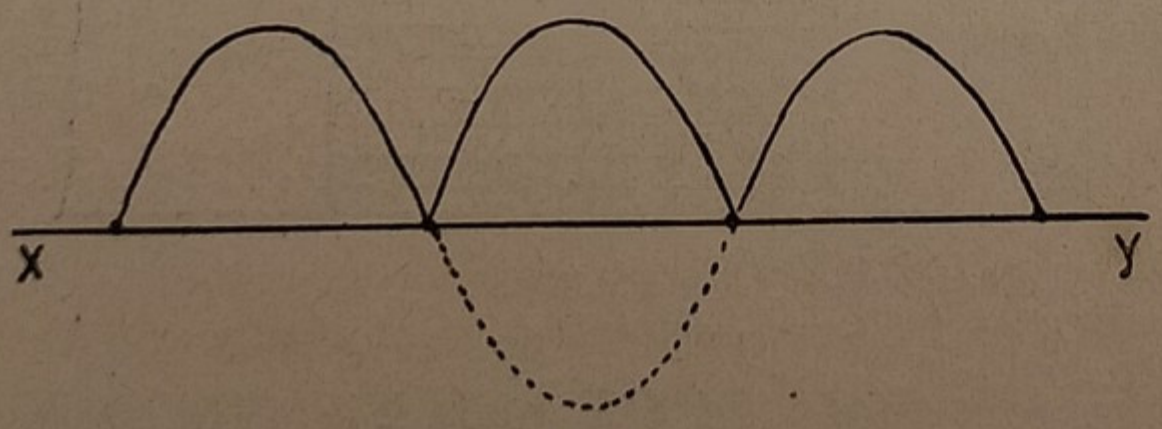


Fig. 500.

La corrente ottenuta non è rigorosamente costante; infatti il commutatore non fa che raddrizzare la metà della corrente, quella inversa di ciascun giro, e portarla nel medesimo senso dell'altra metà. Cioè si ottiene una corrente formata da successivi impulsi, due per ogni giro della spira, ma tutti nello stesso senso. La forma di questa corrente è rappresentata nella Fig. 500, che si ottiene ribaltando

attorno all'asse xy i tratti inferiori della curva, rappresentati con linea punteggiata sotto ad xy. Una corrente di tale specie è formata da successivi impulsi, in ciascuno dei quali la *f.e.m.* varia da zero ad un massimo e poi torna a zero, e così successivamente, ma senza cambiare mai di senso. Essa si chiama una **corrente pulsante**; e si può paragonare al getto intermittente di una pompa idraulica senza camera d'aria, (Vol. 1° - § 191).

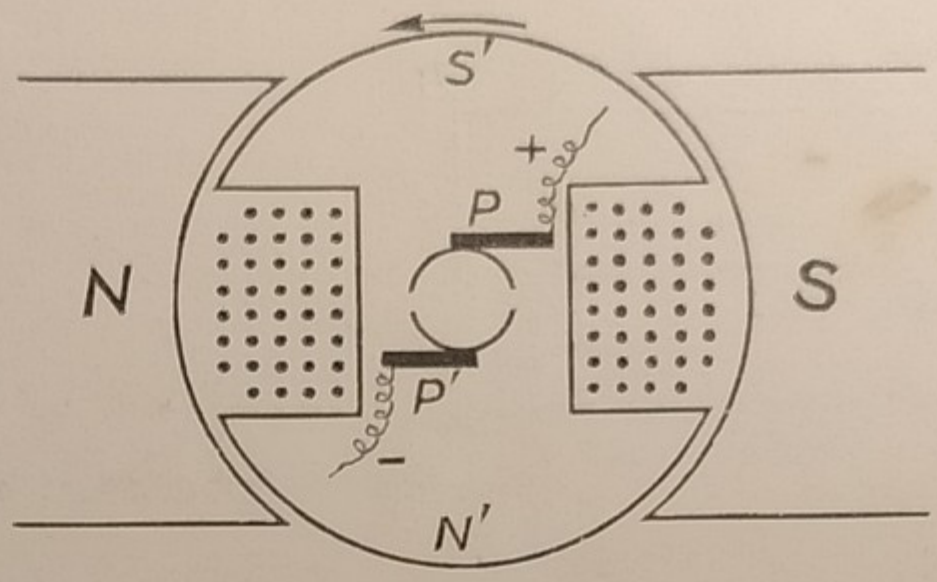


Fig. 501.

333. **Macchina magneto-elettrica del Siemens.** — In pratica per ottenere una corrente di *f.e.m.* notevole, invece di una sola spira si fa uso di molte spire, avvolte a rocchetto su di un cilindro di ferro dolce, che per la sua permeabilità concentra dentro le spire un maggior numero di linee di forza. Questa parte della macchina si chiama **armatura** o **indotto**; essa è rappresentata in sezione, schematicamente, nella Fig. 501, e in prospettiva nella Fig. 502, e si chiama **indotto Siemens** o **a doppio T** per la forma schematica I del suo nucleo di ferro. L'indotto gira fra i poli NS di un magnete; le spire, in sezione, sono rappresentate dai puntini; la corrente è raccolta dalle spazzole PP', ed è resa continua col commutatore avanti descritto.

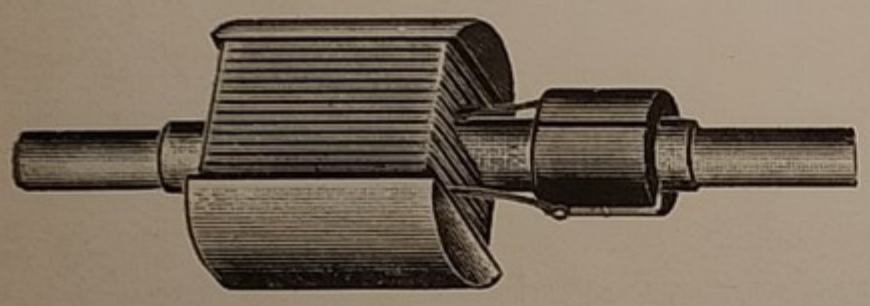


Fig. 502.

La macchina del Siemens dà una corrente pulsante, scintilla fortemente alle spazzole, ed ha scarso rendimento. Oggi è usata solo per la sua semplicità, in pochi casi; p. es., per fare agire la suoneria dei telefoni. La Fig. 503 mostra una di queste macchinette per chiamata telefonica; agisce facendo girare a mano la piccola manovella che si vede a destra.

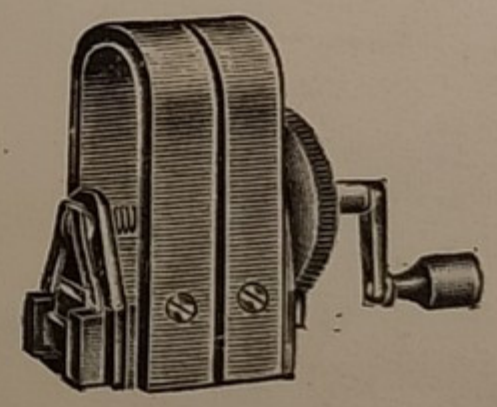


Fig. 503.

334. **Anello di Pacinotti.** — È merito dell'italiano Pacinotti [1], di avere costruito un indotto di funzionamento assai migliore e di alto rendimento, che ha reso possibile l'applicazione pratica ed in vasta scala di queste macchine. Tale indotto ha perciò il nome di **anello di Pacinotti.**

Per spiegarne il funzionamento, osserviamo dapprima che la stessa variazione di flusso ad ogni giro, come nell'esperienza di Palmieri, avviene in una spira anche quando ruota attorno ad un asse fuori di essa, come

---

(1) Pacinotti Antonio, fisico dell'Univ. di Pisa; n. a Pisa nel 1841, m. ivi nel 1912. L'anello di Pacinotti è stato inventato e descritto nel 1863; ma il Pacinotti non seppe dargli quella diffusione pratica che ebbe in seguito. È stato il meccanico belga Gramme che per il primo a Parigi nel 1870, costruì praticamente e diffuse queste macchine, che spesso ne portano ingiustamente il nome.

è indicato nella Fig. 504. Nella Fig. 505 sono rappresentate le quattro posizioni principali di una spira circolare, durante il suo giro; s'immagini il

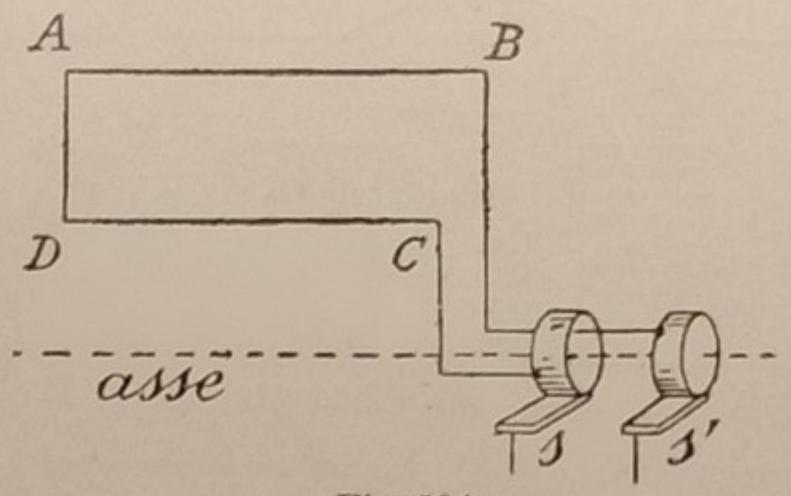


Fig. 504.

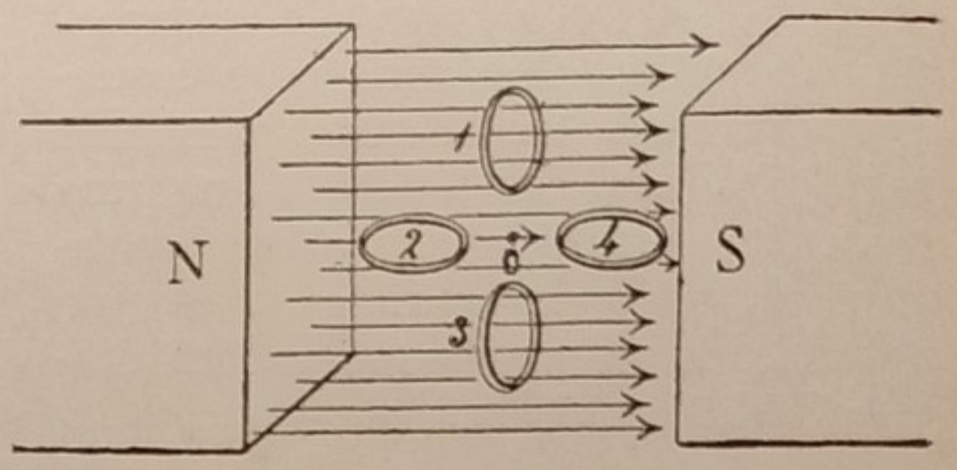


Fig. 505.

piano della spira perpendicolare a quello del foglio: in 1 il flusso è $+a$, in 3 è $-a$, in 2 e 4 è zero.

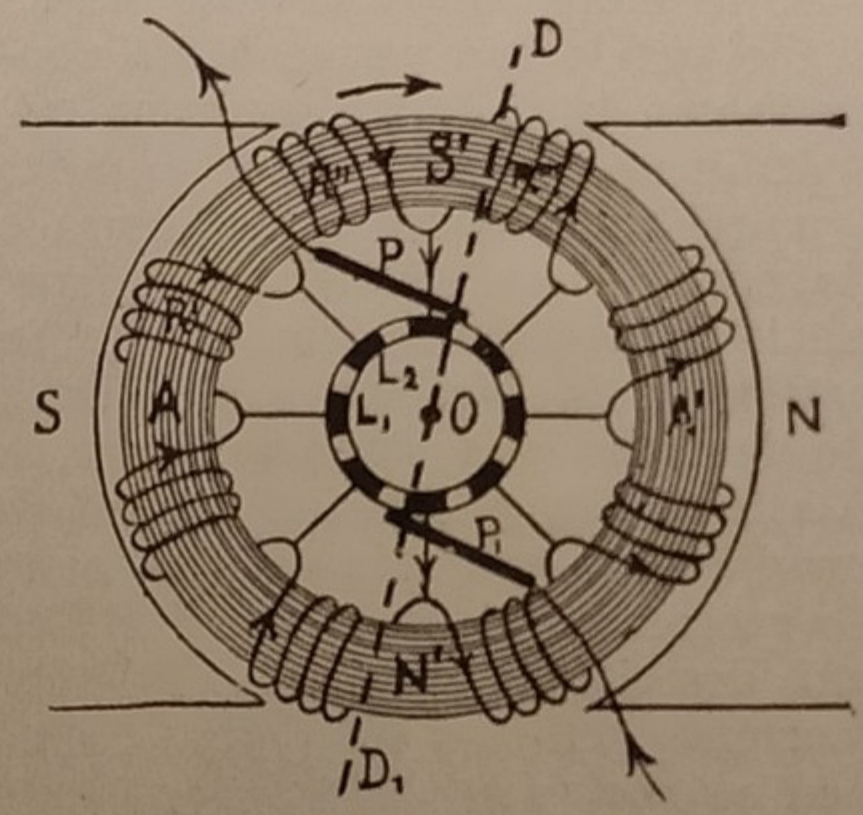


Fig. 506.

Ciò posto, si abbia un *anello* di ferro AA', che possa girare tra i poli NS di una calamita, attorno ad un asse O passante pel suo centro, (Fig. 506). Attorno a questo anello è avvolto un filo di rame isolato, in molte spire, diviso in più sezioni $R'-R''-R'''\ldots$; queste sono congiunte in serie, cioè la fine di una sezione col principio della successiva; in modo da formare un avvolgimento continuo, chiuso su sè stesso. Ciascuno dei punti di congiunzione di due sezioni contigue, comunica con una *laminetta* $L_1-L_2\ldots$ di rame; queste laminette sono isolate fra loro e dall'asse O, e sono disposte attorno ad O secondo le generatrici di un cilindro; tutte insieme formano il **collettore** della macchina. Su questo poggiano due **spazzole** fisse P e P_1, i cui punti di contatto sul collettore sono su un diametro DD_1 quasi perpendicolare alle linee di forza, che come è noto sono nella direzione NS. Alle spazzole sono collegati i reofori che portano la corrente nel circuito esterno.

Allorchè si fa ruotare l'anello, le spire di tutte le sezioni sono sede di correnti alternate, che si iniziano in tempi successivi nelle varie spire, man mano che esse arrivano al diametro DD_1. Cioè nelle spire delle sezioni che sono a destra del *diametro di commutazione* DD_1 la corrente è *sempre* di senso contrario a quella delle spire delle sezioni che sono a sinistra; quindi tanto le sezioni di destra quanto quelle di sinistra inviano insieme correnti su una spazzola, p. es. su P, da cui esce, attraversa il circuito esterno, e ritorna all'altra spazzola P_1. *La corrente pertanto nel circuito esterno è continua.*

La Fig. 507 fa meglio vedere come è fatto in pratica l'anello di Pacinotti; F è il ferro, r le sezioni dell'avvolgimento, L il collettore, $P-P_1$ le

spazzole. Il ferro dell'anello non ha solamente l'ufficio di sostenere le spire perchè ruotino; ma per la sua permeabilità al solito aumenta ed intensifica

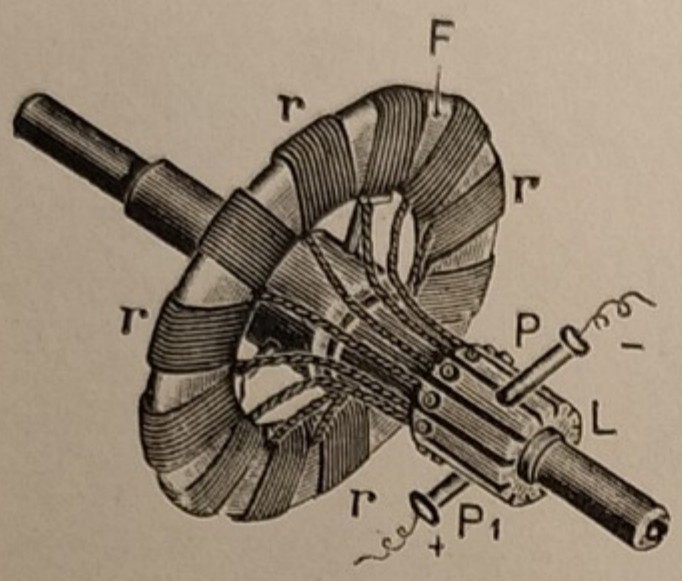


Fig. 507.

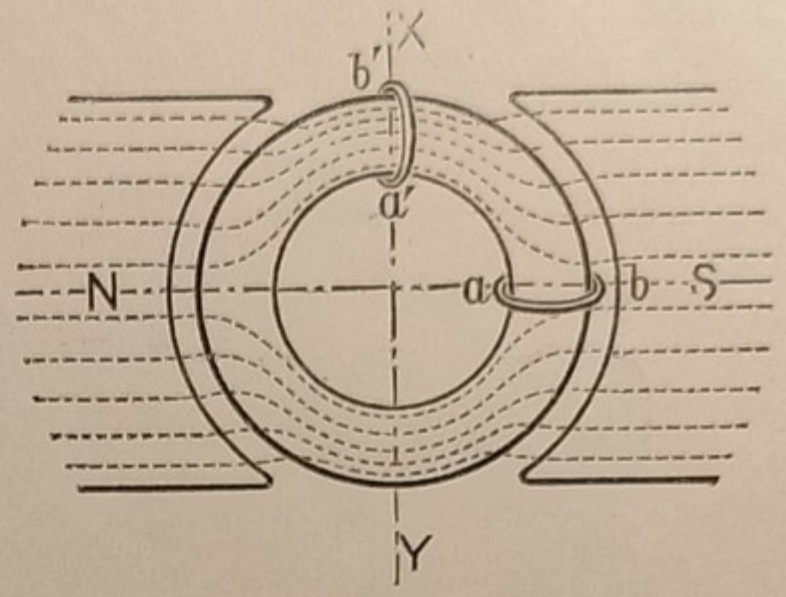


Fig. 508.

assai il flusso che attraversa le spire; le linee di forza assumono l'andamento indicato nella Fig. 508, nella quale è evidente come il flusso attraverso la spira nella posizione $a'b'$ è massimo e in ab è zero.

La Fig. 509 mostra una macchinetta, costruita secondo quanto si è spiegato fin'ora: C è la calamita fra cui i poli NS ruota l'indotto I, per mezzo di una manovella M, la cui rotazione viene trasmessa a una ruota dentata R, che ingrana su un rocchetto portato dall'asse dell'indotto I; la corrente si raccoglie dalle spazzole P e P_1.

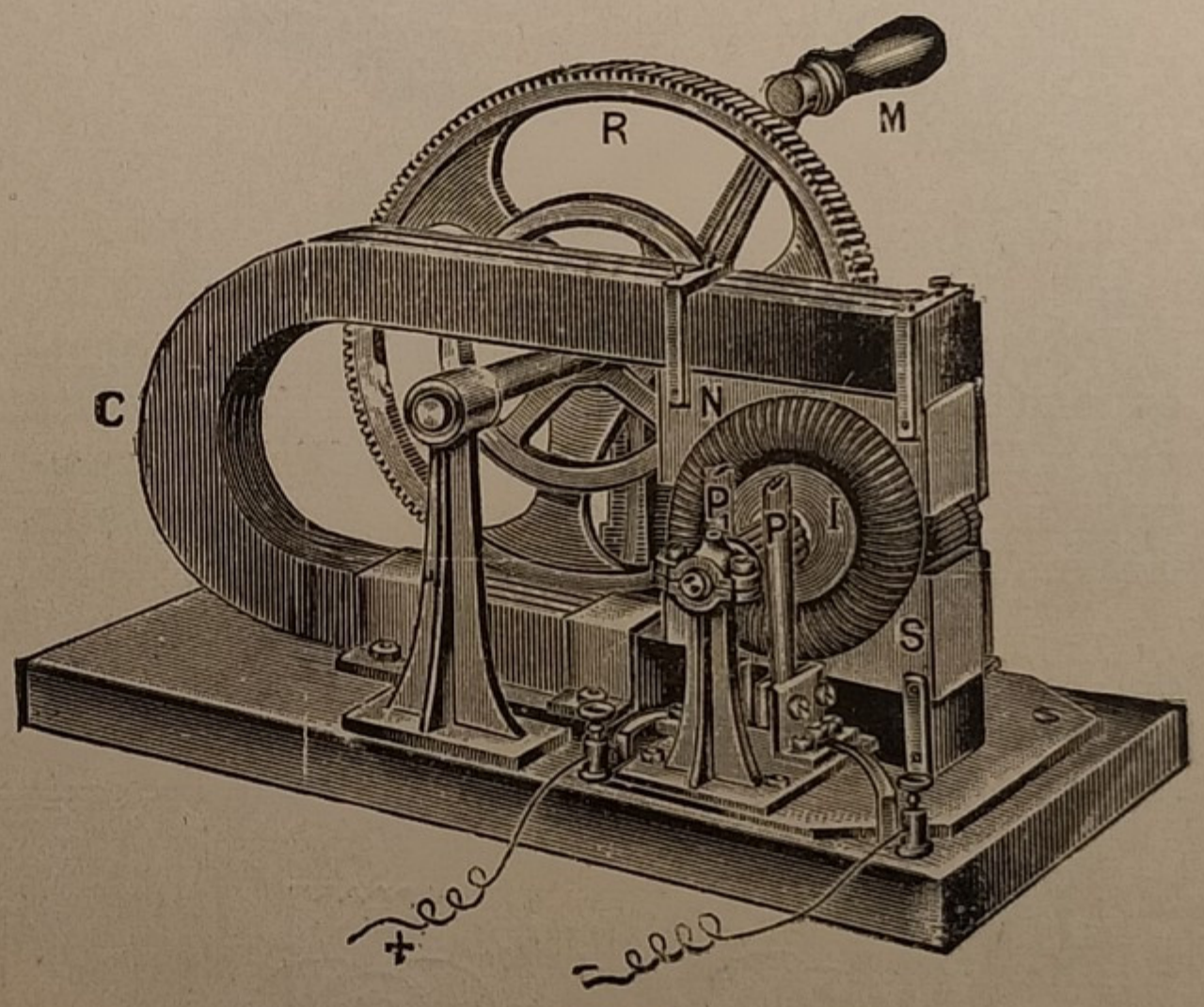


Fig. 509.

335. **Macchine magneto e dinamo-elettriche - Eccitazione della dinamo.** — Abbiamo supposto nel paragrafo precedente, che il campo magnetico induttore sia ottenuto con una calamita permanente; in questo caso la macchina si chiama **magneto-elettrica** o semplicemente **magnete.**

Poichè i magneti permanenti producono campi magnetici deboli, la macchina riesce di grandi dimensioni rispetto alla potenza della corrente generata; quindi non è adoperata che per scopi speciali; come, ad es., per produrre la scintilla occorrente per l'accensione nei *motori a scoppio* (Vol. 1° - § 332).

Ma poichè con le elettrocalamite si ottengono, a pari peso e dimensioni, campi magnetici assai più intensi, era ovvio di ricorrere ad esse per la creazione del campo induttore; in questo caso la macchina si chiama **dinamo-elettrica** o semplicemente **dinamo.** La Fig. 510 mostra una delle prime di-

namo, nella forma datale dal Gramme, e la Fig. 511 mostra la prima dinamo installata in Europa, e precisamente a Milano, nel 1882, nella forma datale da Edison; essa forniva la corrente elettrica necessaria per accendere 60 lampadine elettriche.

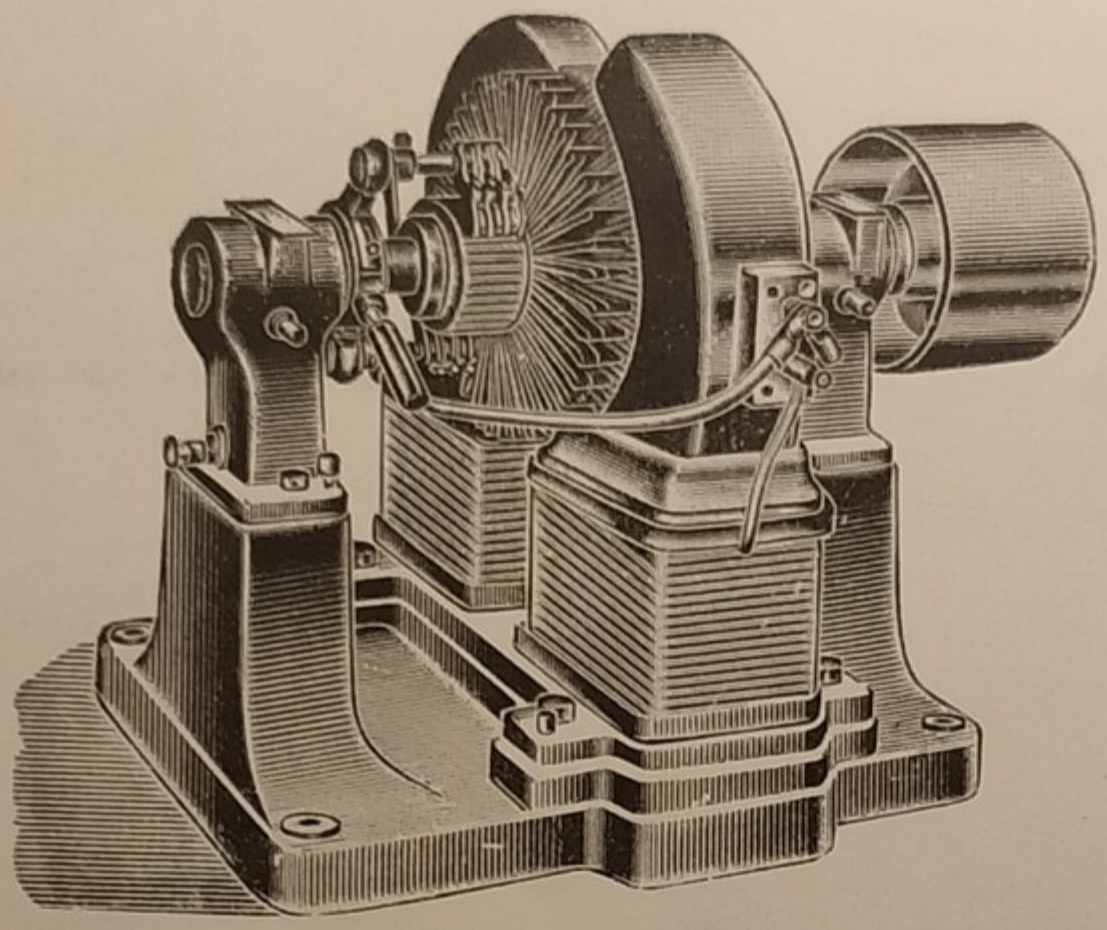


Fig. 510.

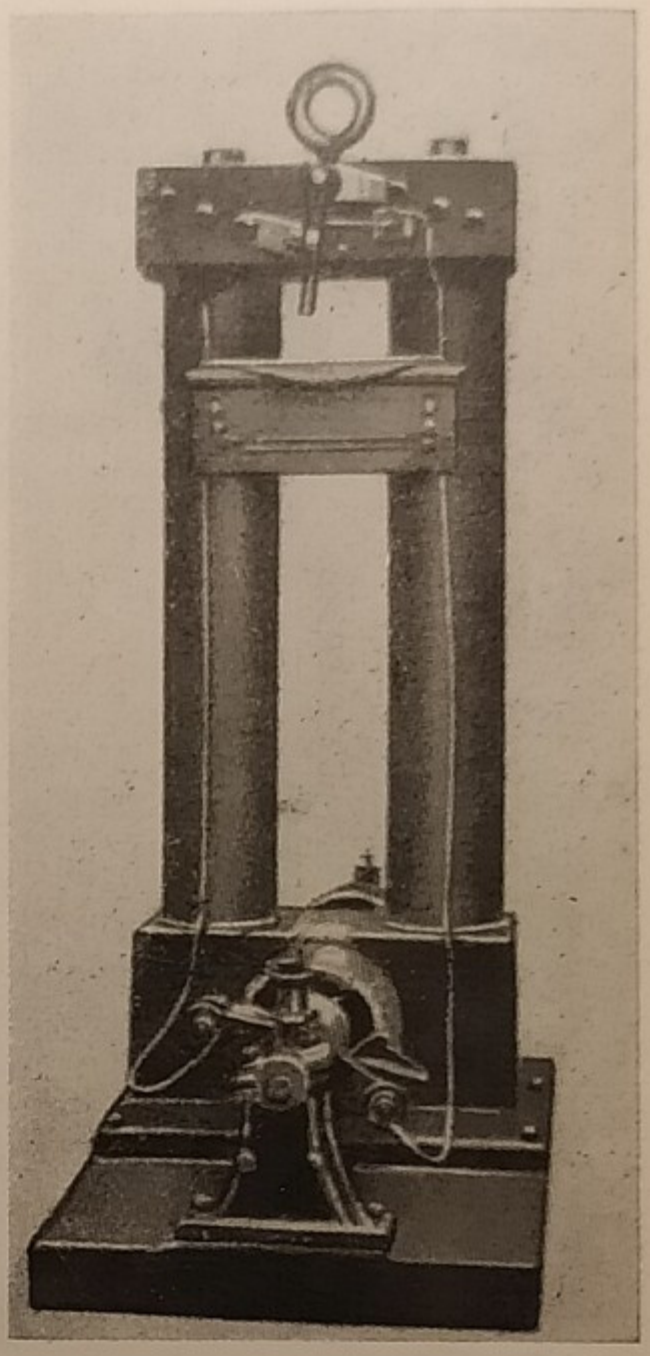


Fig. 511.

Però l'elettrocalamita per funzionare richiede corrente; questa è una parte di quella generata dalla dinamo stessa. Il circuito dell'elettrocalamita si può collegare con quello dell'indotto in tre modi diversi:

1. **Eccitazione in serie.** Come si vede nella Fig. 512, l'avvolgimento dell'elettromagnete induttore è inserito *in serie* con l'indotto *A* e col circuito esterno *r*. Perchè non abbia forte resistenza, che indebolirebbe la corrente, il filo di tale avvolgimento deve essere grosso e di pochi strati.

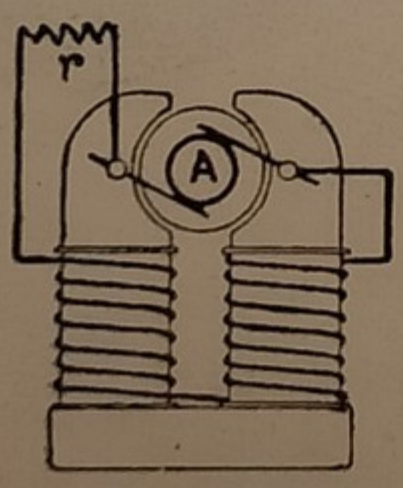


Fig. 512.

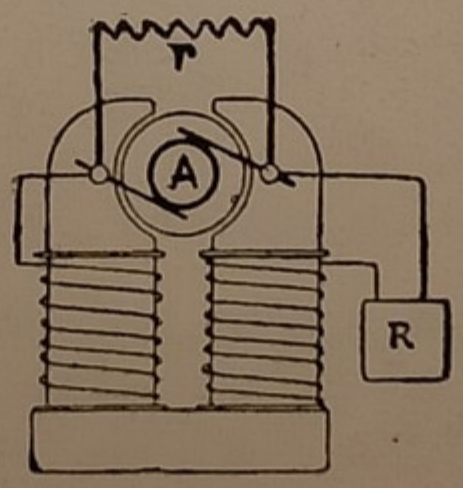


Fig. 513.

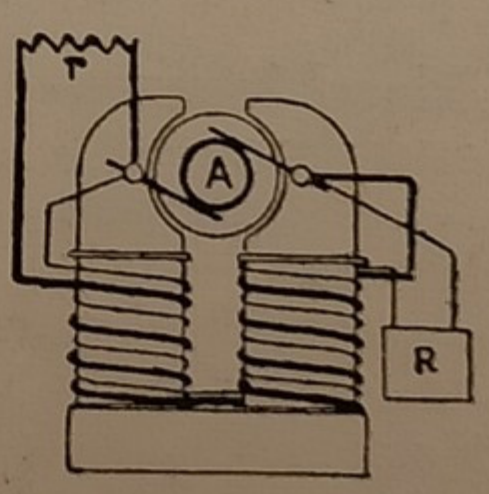


Fig. 514.

2. **Eccitazione in derivazione.** È la più adoperata; come si vede in Fig. 513, la corrente dell'armatura *A* si divide in due parti: la parte maggiore va nel circuito esterno *r*; la parte minore va nell'avvolgimento dell'elettrocalamita, che è inserita in *derivazione* sull'armatura; perciò questo avvolgimento deve essere di grande resistenza, cioè di filo sottile e in mol-

tissime spire. Un reostato R, inserito nel circuito induttore, serve a regolare l'intensità della corrente di questo, e quindi la *f.e.m.* della corrente indotta generata nell'armatura.

3. **Eccitazione compound.** Vuol dire eccitazione composta, cioè è la combinazione dei due casi precedenti: l'elettrocalamita ha due avvolgimenti distinti, (Fig. 514); uno di filo grosso in serie, l'altro di filo sottile in derivazione.

Per eccitare la dinamo basta mettere in moto l'armatura; l'eccitazione avviene perchè nei poli dell'induttore vi è sempre un po' di magnetismo residuo che genera da principio una debole corrente indotta; questa comincia a circolare nell'avvolgimento induttore e rinforza il campo magnetico; così aumenta la corrente indotta, e via via gradatamente aumenta sempre più, sino a raggiungere, in pochi secondi, il suo valore normale.

336. **Rendimento della dinamo - Dinamo multipolari.** — Per muovere l'indotto della dinamo (senza di che non si avrebbe corrente), si richiede una forza motrice, di potenza proporzionata all'energia elettrica che si produce. Tale forza può essere fornita o da una macchina a vapore o da un motore a scoppio o meglio da una **turbina idraulica**; (Vol.1° - § 202).

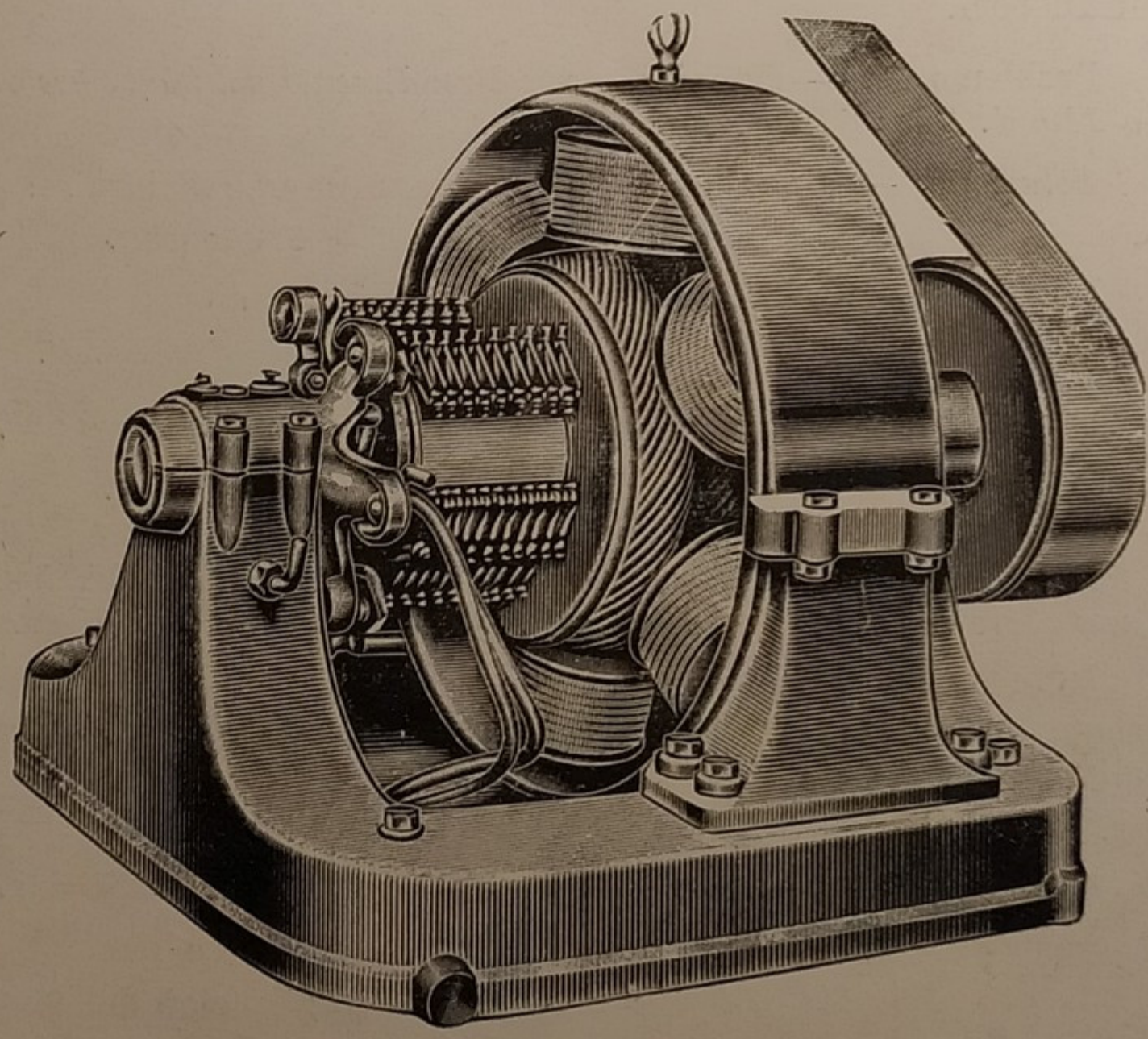


Fig. 515.

In tal guisa si trasforma l'energia meccanica in energia elettrica. E poichè l'energia meccanica oggi si produce a buon mercato, così l'energia elettrica ottenuta è pure a basso costo; come già s'era predetto al § 330.

Teoricamente per ogni cavallo-vapore impiegato a far muovere la dinamo, si dovrebbero ottenere 736 *watt* di potenza elettrica (§ 280); ma nella trasformazione dell'energia meccanica in elettrica sono inevitabili alcune perdite, dovute agli attriti della macchina, al calore prodotto dalla corrente, alla energia occorrente per l'eccitazione del campo induttore, alle correnti di Foucault (§ 322), ecc. Quest'ultime si riducono al minimo, facendo il nucleo di ferro dell'armatura anzichè massiccio, con più lamine di ferro sovrapposte ed isolate una dall'altra con carta velina o vernice; così non v'è più un conduttore massiccio che ruoti nel campo magnetico.

Si chiama rendimento della dinamo il rapporto tra i *watt* da essa forniti e quelli che dovrebbe fornire, in base a 736 per ogni *HP* impiegato a far ruotare l'armatura. Cioè, se la dinamo produce *w watt* e assorbe *n HP*, il suo rendimento è:

4) $$R = \frac{w}{736\, n}.$$

Il rendimento di una buona dinamo può raggiungere il 92 %.

Per la legge dell'induzione, la *f.e.m.* della corrente indotta generata dalla dinamo cresce con la velocità di rotazione della sua armatura. Nelle macchine grandi tale velocità non può raggiungere forti valori; per diminuirla è conveniente far ruotare l'armatura fra più coppie di poli magnetici, anzichè fra una sola coppia.

Così ad es., con un campo induttore di 4 poli, si ottiene ad ogni giro la stessa variazione di flusso che con due giri della macchina bipolare.

La Fig. 515 mostra una delle forme usuali delle dinamo moderne, a 6 poli induttori.

Problema 1°. — *Una dinamo, col rendimento del 90%, assorbe 15 HP e dà corrente a 110 V. Quanti amp. essa fornisce?*

Soluzione. — La dinamo teoricamente dovrebbe fornire:

$$(15 \times 736)\ watt = 11040\ watt.$$

Col rendimento del 90% ne fornisce invece:

$$(11040 \times 0{,}90)\ watt = 9936\ watt.$$

Se la tensione della dinamo è di 110 *V*, essa produrrà (§ 280 - 2):

$$I = \frac{9936}{110}\ amp. = \mathbf{90{,}3\ amp.}$$

Problema 2°. — *Con un motore di 15 HP si mette in funzione una dinamo capace di una corrente di 120 V, e 81 amp. Qual'è il rendimento di questa?*

Soluzione. — Supponendo che nella trasmissione del moto dall'albero del motore a quello della dinamo si abbia un rendimento del 96%, la potenza utile disponibile all'albero della dinamo è:

$$W = (15 \times 0{,}96)\ HP = 14{,}4\ HP = (14{,}4 \times 736)\ watt = 10598\ w.$$

La corrente erogata è: $W' = (120 \times 81)\ watt = 9720\ w.$

Il rendimento perciò è:

$$\varrho = \frac{W'}{W} = \frac{9720}{10598} = 92; \qquad \text{cioè del } 92\ \%.$$

337. **Alternatori.** — La corrente alternata è utilizzata oggi più frequentemente della continua, per ragioni che studieremo in seguito (§ 351); le macchine che la producono si chiamano **alternatori.**

Un alternatore potrebbe essere la stessa dinamo, quando si abolisse il collettore e si raccogliesse la corrente per mezzo di due anelli, come nella prima esperienza di Palmieri, (Fig. 496). In tal guisa verrebbe nel circuito esterno la corrente come si forma nelle spire dell'armatura, cioè *corrente alternata.*

Ma in questa maniera si produrrebbero due sole alternazioni di corrente ad ogni giro. Oggi le correnti alternate usate nell'industria hanno da 84

a 100 alternazioni al minuto secondo; per ottenerle con la dinamo bipolare, occorrerebbe far compiere alla sua armatura da 42 a 50 giri al minuto secondo; velocità troppo grande per macchine grosse. Si elimina questa difficoltà nella stessa maniera che abbiamo visto per la dinamo nel paragrafo precedente; cioè aumentando il numero dei poli dell'induttore. Ma a differenza che per la dinamo, si preferisce più spesso nell'alternatore fare l'induttore girevole in mezzo, e l'indotto fisso attorno ad esso.

Per l'eccitazione del campo induttore occorre la corrente continua, quindi non si può più adoperare come nella dinamo, parte della corrente generata dalla macchina, che è ora alternata. Occorre perciò per l'eccitazione una piccola dinamo ausiliaria, detta **eccitatrice**. Non descriviamo più minutamente l'alternatore, che sarebbe compito dell'elettrotecnica.

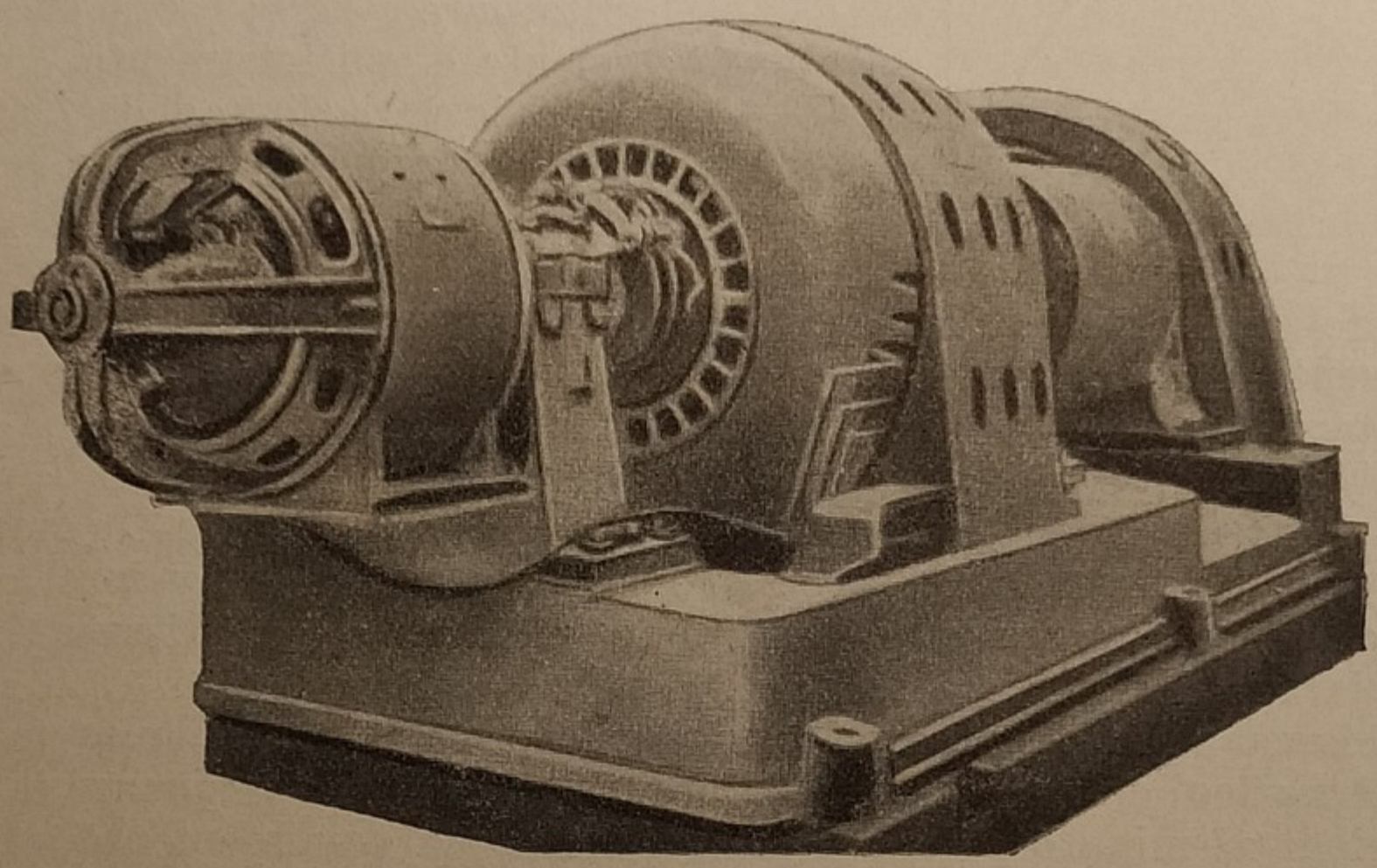


Fig. 516.

La Fig. 516 rappresenta un alternatore moderno, alto qualche metro, capace di fornire corrente di potenza equivalente a centinaia di *HP*. La dinamo eccitatrice è quella più piccola rappresentata a sinistra, all'estremità dell'asse dell'alternatore, in modo da far ruotare insieme le due macchine sullo stesso asse.

Problemi da risolvere.

1. Quante lampade ½ w. da 100 *cand.* si possono alimentare disponendo di un motore da 5 *HP*? (Rendimento: della dinamo 87%; della linea di distribuzione 95%).

2. Si vuole alimentare con una dinamo un impianto di:

150	lampade	½ w.	da	50 *cand.*	ciascuna
200	»	normali	»	32 »	»
20	»	filo carbone	»	16 »	»
50	»	ad arco da 55 *V*, 10 *amp.*			

La tensione di esercizio è 110 *V*. Calcolare:

a) la potenza del motore che deve comandare tale dinamo, se il rendimento totale dell'impianto è dell'80%;

b) l'intensità della corrente erogata dalla dinamo;

c) la resistenza del circuito esterno.

Correnti alternate.

338. **Rappresentazione grafica della corrente alternata.** — Abbiamo visto (§ 331) che la corrente alternata è quella che cambia di senso molte volte al minuto secondo; essa varia da zero a un valore massimo in un dato senso, che chiameremo positivo, poi ritorna a zero, indi acquista un valore massimo in senso opposto, che chiameremo negativo, per poi ritornare a zero; e così successivamente e continuamente.

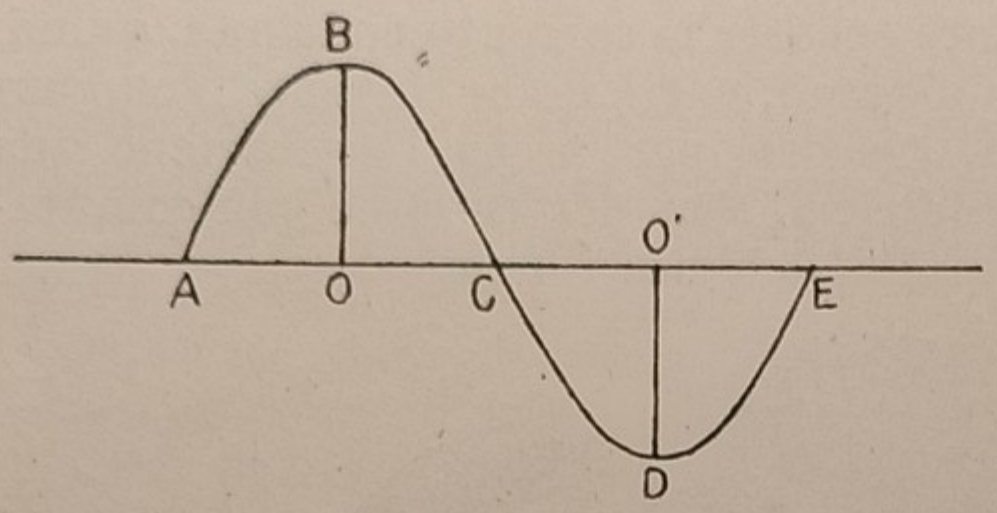


Fig. 517.

Tale variazione della *f.e.m.* l'abbiamo rappresentata graficamente con la curva della Fig. 497, che abbiamo chiamata *sinusoide*; per maggiore comodità torniamo a riprodurla nella Fig. 517. Il tratto ABC rappresenta la variazione della *f.e.m.* nel senso positivo, corrispondente alla rotazione di mezzo giro della spira dell'esperienza di Palmieri (§ 331); cioè la *f.e.m.* cresce da zero in A sino ad un valore massimo OB, dopo un quarto di giro della spira; poi decresce e si riduce a zero in C compiuto il mezzo giro. Nel mezzo giro successivo la *f.e.m.* cresce in valore assoluto, ma è di senso contrario; da zero al massimo $O'D$, per ritornare a zero in E alla fine del giro. E così successivamente ad ogni giro.

Si chiama **periodo** il tempo in cui si compie il giro, comprendente le due **alternazioni** o **semiperiodi** ABC e CDE; si chiama **frequenza** il numero dei periodi al minuto secondo; la frequenza più comunemente adoperata nella tecnica è di 42 periodi al secondo, e si scrive: 42 $\sim$.

339. **Valori efficaci della f. e. m. e della intensità della corrente alternata.** — Gli effetti della corrente alternata non dipendono dal valore massimo E_0 della *f.e.m.* durante un periodo; ma da un valore più piccolo, che si chiama la **f.e.m. efficace**; essa è uguale ad $\frac{E_0}{\sqrt{2}}$, cioè circa 0,7 della *f.e.m.* massima, ed è quella che si misura e si computa nella pratica. Così, corrente alternata a 120 V, vuol dire una corrente alternata la cui *f.e.m.* ad ogni periodo varia da zero a 170 V in un senso e da zero a 170 V nell'altro senso.

L'intensità della corrente alternata non è costante; ma anch'essa varia come la *f.e.m.* da un massimo in un senso ad un massimo in senso contrario, annullandosi due volte in ciascun periodo. Anche ora per le applicazioni pratiche si stabilisce una **intensità efficace**; la quale non si determina, come per le correnti continue, in base alla legge di Ohm (§ 271); ma si calcola con la seguente formula, dedotta col calcolo:

$$1) \qquad I = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \; ;$$

nella quale I ed E sono *l'intensità* e la *f.e.m. efficaci*, ed R la resistenza del circuito; $\omega = 2\pi n$ (n = *frequenza* della corrente) si chiama la **pulsazione** ed L è l'*induttanza* (§ 324); il prodotto ωL si chiama la **reattanza**.

L'espressione $\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$ si chiama **impedenza** o **resistenza apparente**; e quindi l'intensità della corrente alternata si calcola come per la legge di Ohm, quando al posto della resistenza si ponga l'*impedenza*.

L'intensità della corrente alternata, a pari *f.e.m.* in un circuito di eguale resistenza R, è perciò più piccola che per la corrente continua; per la quale sarebbe:

$$I_1 = \frac{E}{R},$$

a cui si riduce la 1) per $\omega = 0$, cioè supponendo la corrente continua. L'intensità I è tanto minore, quanto più grande è l'*induttanza* L del circuito e la *frequenza* della corrente. Circuiti quindi che offrirebbero minima resistenza alla corrente continua, possono invece ridurre ad un valore piccolo la corrente se alternata. Si comprende così l'uso delle **resistenze induttive** per la corrente alternata, formate da rocchetti di filo di rame avvolto su nucleo di ferro, dotati cioè di forte induttanza e quindi di grande impedenza. Queste resistenze induttive hanno il vantaggio di indebolire la corrente senza consumo di energia elettrica; mentre i reostati (§ 273) indeboliscono la corrente perchè ne consumano una parte nella resistenza intercalata, trasformandola in calore non utilizzato, e perciò consumano energia.

340. **Fattore di potenza.** — La formula 2) del § 280 non è applicabile per le correnti alternate. La potenza cioè della corrente alternata è minore del prodotto della *f.e.m.* E per l'intensità I. Si dimostra che tale energia è:

$$2) \qquad W = E\,I\cos\varphi,$$

in cui E ed I sono i valori efficaci della corrente, e $\cos\varphi$ è un fattore, minore dell'unità, che si chiama il **fattor di potenza.** Esso ha un valore variabile con la forma e l'induttanza del circuito; per circuiti formati con lampadine ad incandescenza è pressochè eguale ad 1; per un motore elettrico scende invece a circa 0,80.

341. **Corrente monofase.** — Esaminiamo brevemente alcuni casi di accoppiamenti di correnti alternate.

La corrente alternata come quella fin'ora studiata, e rappresentata dalla curva della Fig. 517, si chiama *alternata semplice* o **monofase.** Essa richiede due fili per la sua distribuzione, come quella continua.

Due correnti continue non possono differire che per il valore della *f.e.m.*

Due correnti alternate monofasi possono invece differire:

1. Anch'esse **per il valore della f.e.m.** La Fig. 518 rappresenta due correnti alternate AB ed $A'B'$ eguali in tutto, tranne che la *f.e.m.* della $A'B'$ è una volta e mezzo di quella della AB; ($O'P' = 1{,}5\,OP$).

2. **Per la frequenza.** La Fig. 519 rappresenta due correnti alternate AB ed $A'B'$ di eguale *f.e.m.* ($MN = M'N'$); ma la frequenza della prima è i due terzi di quella della seconda; ($A'B' = {}^2/_3\,AB$).

3. **Per la fase.** Due correnti alternate di egual frequenza, sono *spostate di fase*, se il periodo non s'inizia per entrambe nello stesso istante. La

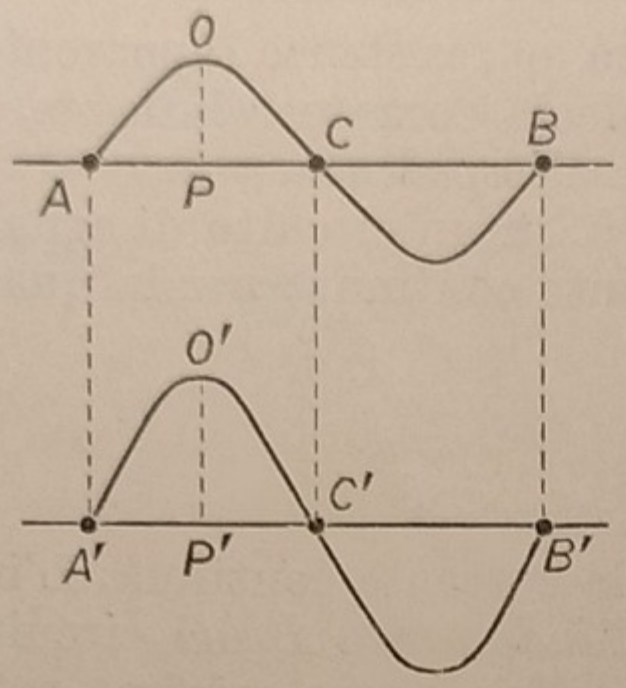


Fig. 518.

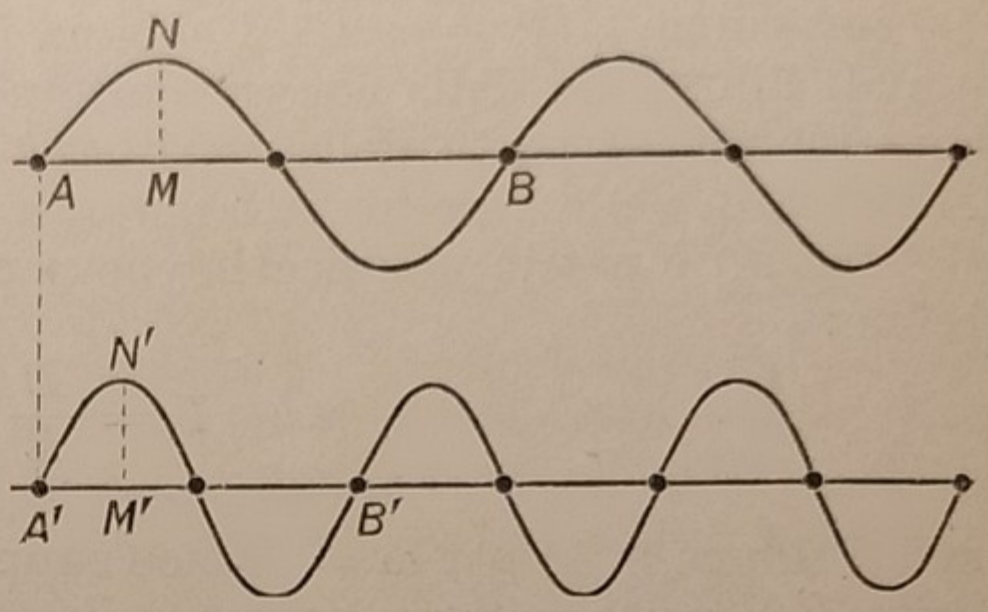


Fig. 519.

Fig. 520 rappresenta due correnti alternate ACB ed $A'C'B'$, di *eguale f.e.m.* ($MN = PQ$), di *eguale frequenza* ($AB = A'B'$), ma *spostate di fase;* perchè mentre il periodo della prima s'inizia in A, il periodo della seconda s'inizia un istante dopo in A'. Se $AA' = \frac{AB}{n}$, si dice che le due correnti sono *spostate di* $1/n$ *di periodo*; oppure, ricordando che il periodo corrisponde ad un giro della spira nell'esperienza di Palmieri, e che AA' corrisponde perciò ad $1/n$ di giro o alla rotazione della spira di $360°/n$, le due correnti si dicono spostate di $1/n$ di giro o di $360°/n$ gradi. Nella Fig. 520, $AA' = 1/8$ di periodo; quindi le due correnti sono *spostate di* $1/8$ *di periodo o di 45°.*

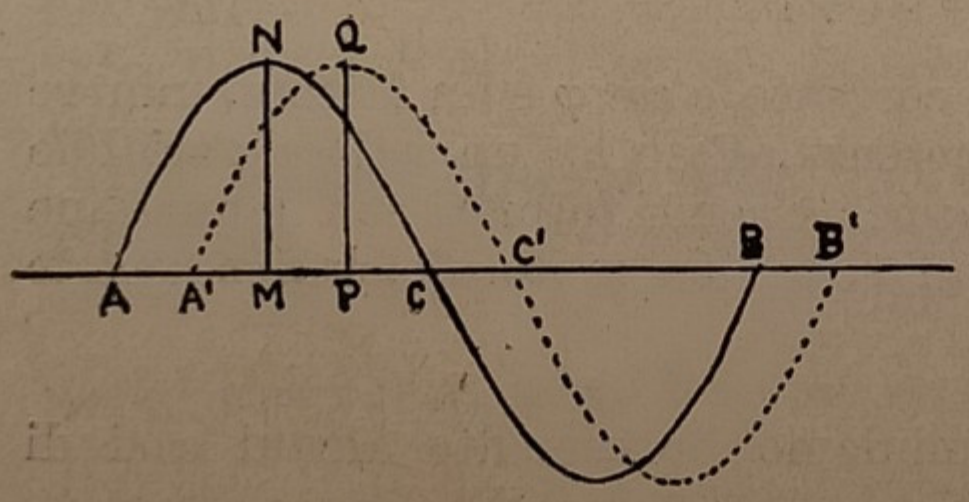


Fig. 520.

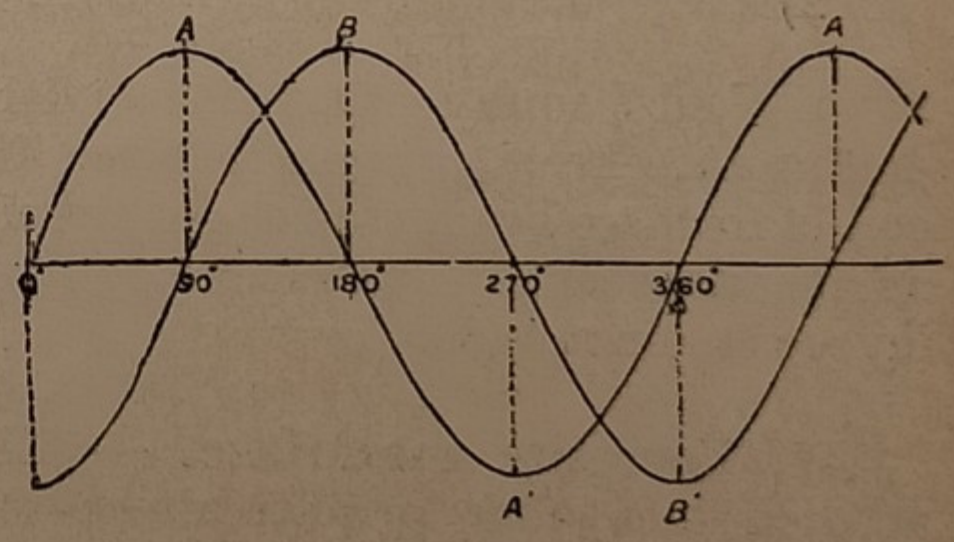


Fig. 521.

342. **Corrente bifase.** — La Fig. 521 rappresenta due correnti alternate *spostate di fase di un quarto di periodo o di 90°*, quali si otterrebbero con due spire dell'esperienza di Palmieri, i cui piani fossero tra loro perpendicolari; in guisa che la corrente è zero in una spira quando è massima nell'altra, e viceversa. Due correnti di tal fatta, utilizzate contemporaneamente con tre fili, di cui due F_1 ed F_2 (Fig. 522) servono per l'andata di ciascuna fase, mentre il 3° filo F_3 serve per il ritorno comune di entrambe, costituiscono la **corrente bifase.** Nella Fig. 522, AB e BC rappresentano le spire della macchina in cui si generano le due correnti sfasate a 90°; L_1

ed L_2 rappresentano lampade od altri apparecchi ricevitori delle due correnti. Se E è la *f.e.m.* di ciascuna fase, ed i l'*intensità* della corrente in F_1 e F_2, è $E\sqrt{2}$ la *f.e.m.* tra F_1 ed F_2 ed $I = i\sqrt{2}$ l'*intensità* nel filo F_3.

343. **Corrente trifase.** — La Fig. 523 rappresenta tre correnti alternate, *spostate di fase di un terzo di periodo o di 120°*; quali si formerebbero in 3 spire dell'esperienza di Palmieri, i cui piani fossero a 120° uno con l'altro. Tre correnti di tal fatta possono distribuirsi con soli 3 fili, ciascuno dei quali serve per l'andata di una fase e contemporaneamente per il ritorno delle altre due; in tal caso formano la **corrente trifase**, che oggi è la più adoperata.

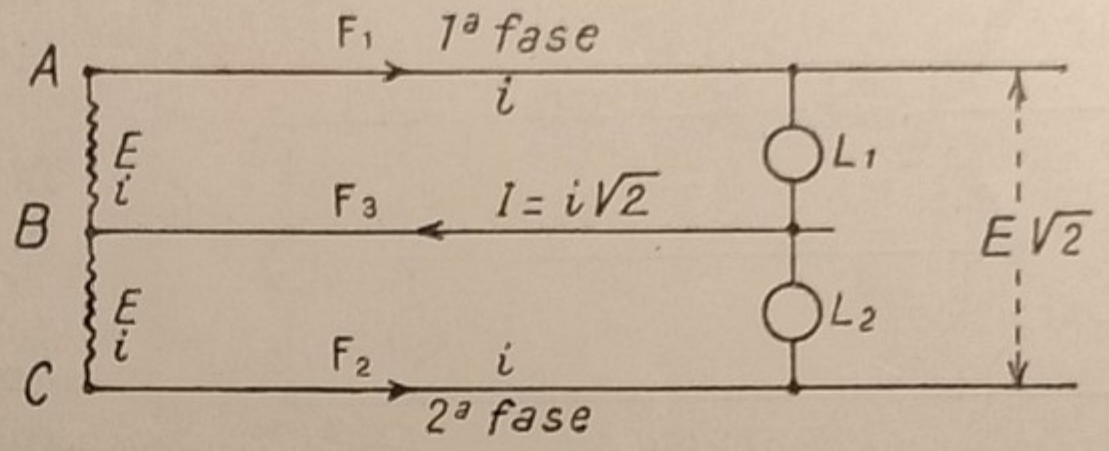


Fig. 522.

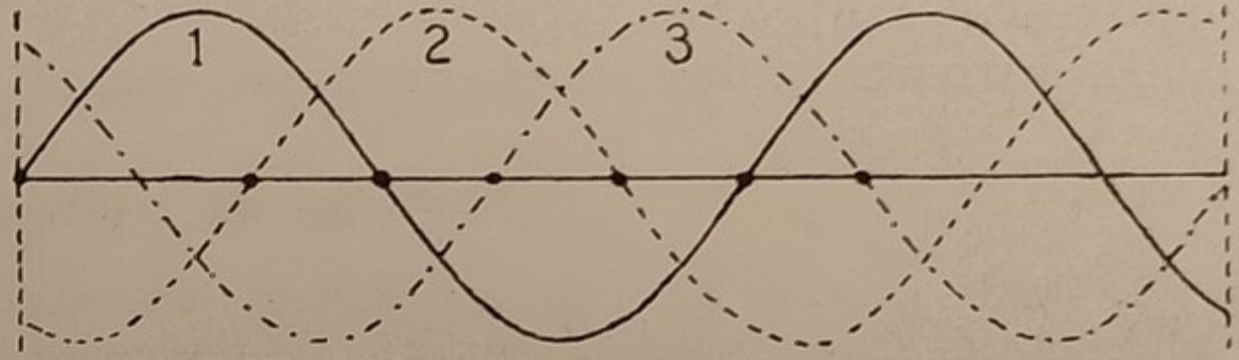


Fig. 523.

La connessione dei circuiti della corrente trifase, può farsi in due modi:

1. A triangolo; come in Fig. 524, in cui AB, BC, AC rappresentano le spire della macchina in cui si generano le tre correnti, sfasate a 120°, ed L_1–L_2–L_3 i tre apparecchi di utilizzazione, pure essi collegati *a triangolo*.

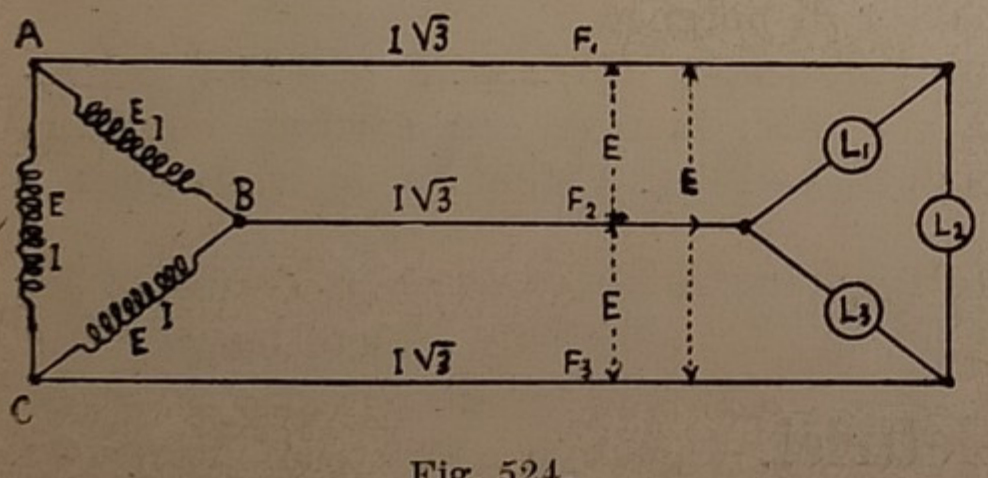


Fig. 524.

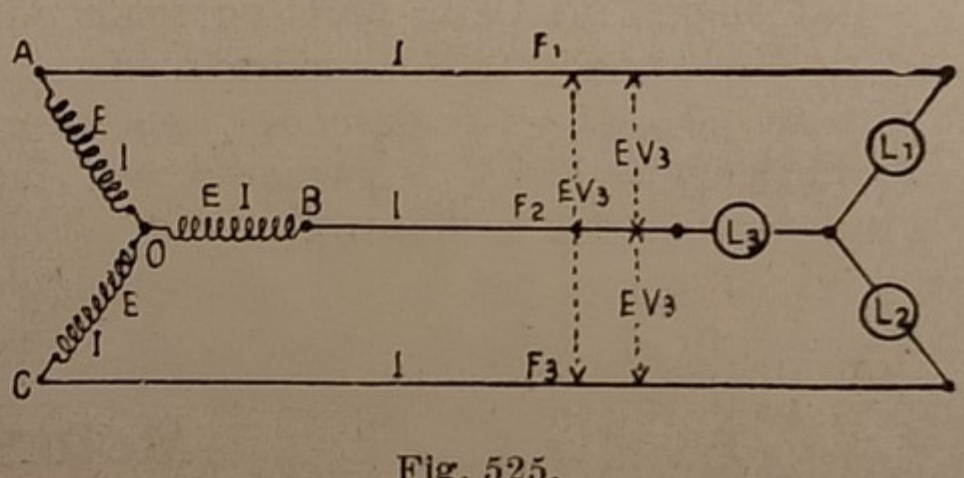


Fig. 525.

Se E ed I sono *f.e.m.* e *intensità* di ciascuna fase, sarà E pure la *f.e.m.* tra due qualunque dei tre fili F_1–F_2–F_3, ma $I\sqrt{3}$ *l'intensità* in ciascuno di questi.

2. A stella; come in Fig. 525, in cui AO, BO, CO, rappresentano le spire della macchina in cui si generano le tre correnti sfasate a 120°, ed L_1–L_2–L_3 i tre apparecchi di utilizzazione pure essi collegati *a stella*. Se E ed I sono *f.e.m.* ed *intensità* di ciascuna fase, sarà pure I l'*intensità* in ciascuno dei tre fili F_1–F_2–F_3, ma $E\sqrt{3}$ la *f.e.m.* tra due qualunque di tali tre fili.

3. A stella con neutro; come in Fig. 526, in cui gli apparecchi di utilizzazione L_1–L_2–L_3 sono collegati tra ciascun filo di fase F_1–F_2–F_3 e un *filo neutro* F_4 partente dal nodo O. È questo il sistema di distribuzione oggi

comunemente adoperato, che permette di utilizzare la corrente trifase per motori a più alto potenziale (usualmente a 220 *V.*) e di suddividerla poi in tre correnti monofasi a più basso potenziale per l'illuminazione, (220 $V : \sqrt{3} = 125\ V.$ circa).

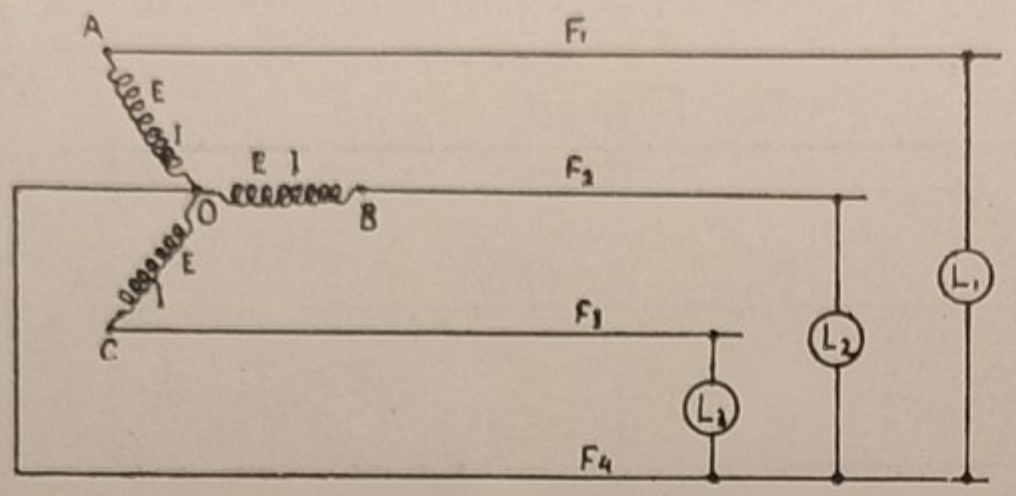


Fig. 526.

La potenza della corrente trifase è in ogni caso misurata con la formula:

$$3) \quad W = EI\sqrt{3}\cos\varphi,$$

essendo E la *f.e.m.* efficace tra due fili di fase, I l'intensità efficace in ciascun filo (supponendo le tre fasi equilibrate, cioè con eguale intensità) e $\cos\varphi$ il fattore di potenza (§ 340).

Le correnti a più fasi si chiamano, con un nome solo, **correnti polifasi.**

Problemi da risolvere.

1. Quale *f.e.m.* si richiede per ottenere l'intensità di 5 *amp.* con una corrente alternata di 42 ~ , in un rocchetto la cui resistenza ohmica è di 6 *ohm* e l'induttanza è di 0,04 *henry?*

2. Qual'è la potenza di un motore necessario ad azionare un alternatore monofase il cui rendimento è del 90%, che fornisce corrente a 125 *V*, 50 ~ , se deve alimentare un circuito la cui impedenza è 0,015 *ohm*, ed il fattor di potenza è di 0,85?

3. Ai morsetti di un alternatore a 50 ~ e 100 *V*, s'inseriscono in serie:

1 rocchetto la cui resist. ohmica è 20 *ohm* e l'induttanza 32 *millihenry*
1 » » » » 25 » » 57 »

Calcolare l'intensità della corrente ed il fattor di potenza.

4. Un rocchetto, alimentato da corrente alternata di *f.e.m.* $E = 125\ V$ e frequenza $n = 42$ ~, è percorso con intensità $i = 6\ A$; mentre con corrente continua di *f.e.m.* $E = 110\ V$ è percorso con intensità $i_1 = 15\ A$. Calcolare la resistenza e l'induttanza del rocchetto.

Motori elettrici.

344. **Elettromotori.** — I motori elettrici sono macchine che trasformano l'energia elettrica in energia meccanica. Si chiamano: *elettromotori* quelli che funzionano con la corrente continua ed *alternomotori* quelli che funzionano con la corrente alternata.

Un elettromotore è formato in modo identico alla dinamo. Cioè la *dinamo è invertibile*: se l'armatura si fa girare produce corrente; se viceversa si manda corrente nell'armatura, questa si mette a girare producendo forza motrice.

Per comprendere come ciò avvenga, esaminiamo ancora la Fig. 501, che riproduciamo nuovamente in Fig. 527, e che dà lo schema dell'armatura Siemens. Se si mettono in comunicazione le due spazzole P e P' coi reofori di un generatore di corrente continua, questa passa nell'avvolgimento dell'armatura, che funziona da elettrocalamita; e si magnetizza il nucleo, for-

mandosi, ad es., un polo Nord N' in basso e un polo Sud S' in alto. Questi poli dell'armatura vengono attratti da quelli del magnete NS, ed essa comincia a girare nel senso della freccia. Se la corrente seguitasse a passare nell'armatura sempre nello stesso senso, questa dopo un quarto di giro si fermerebbe col polo S' di fronte ad N. Ma proprio in quel momento si scambiano i contatti delle due lamine del commutatore con le spazzole, e s'inverte perciò il senso della corrente nell'armatura; s'invertono anche le polarità di questa: al posto del polo S' si forma un polo Nord che sarà respinto da N, e l'armatura continua a girare. E così avviene ad ogni mezzo giro, onde la rotazione è perenne, finchè passa la corrente.

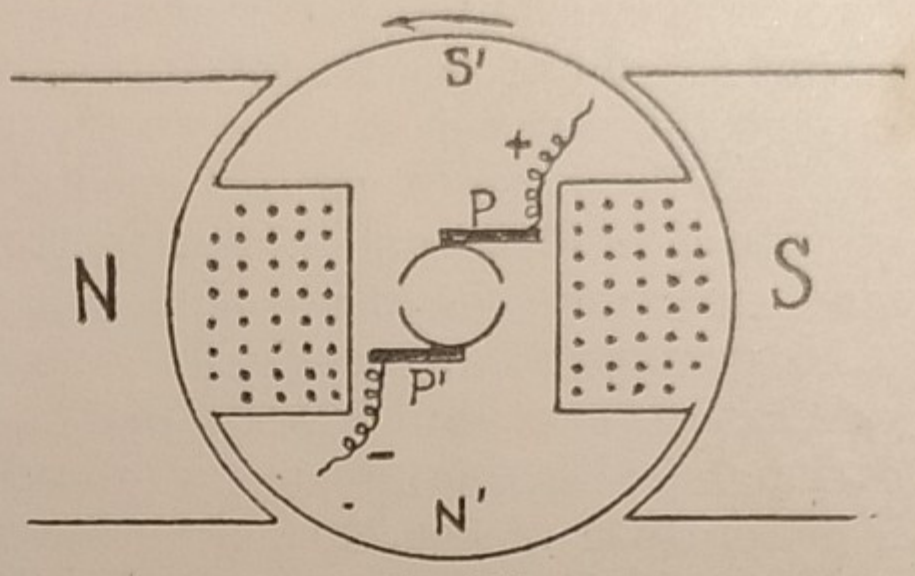


Fig. 527.

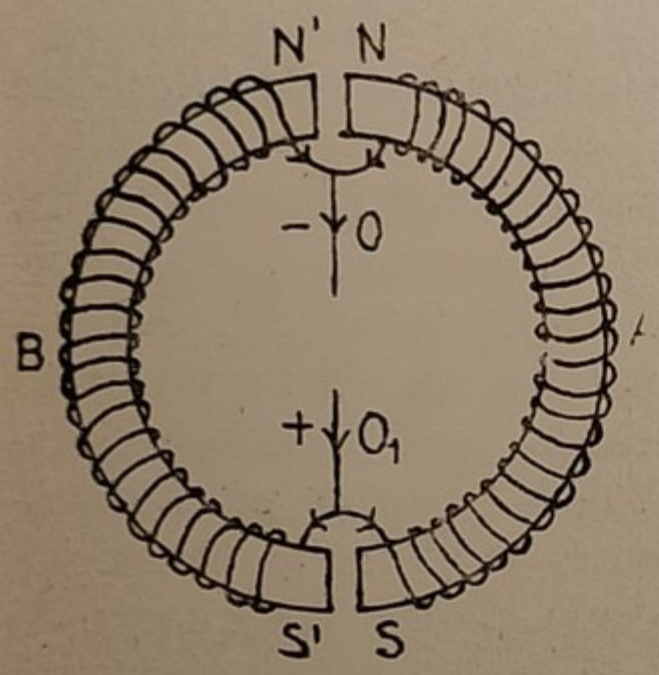


Fig. 528.

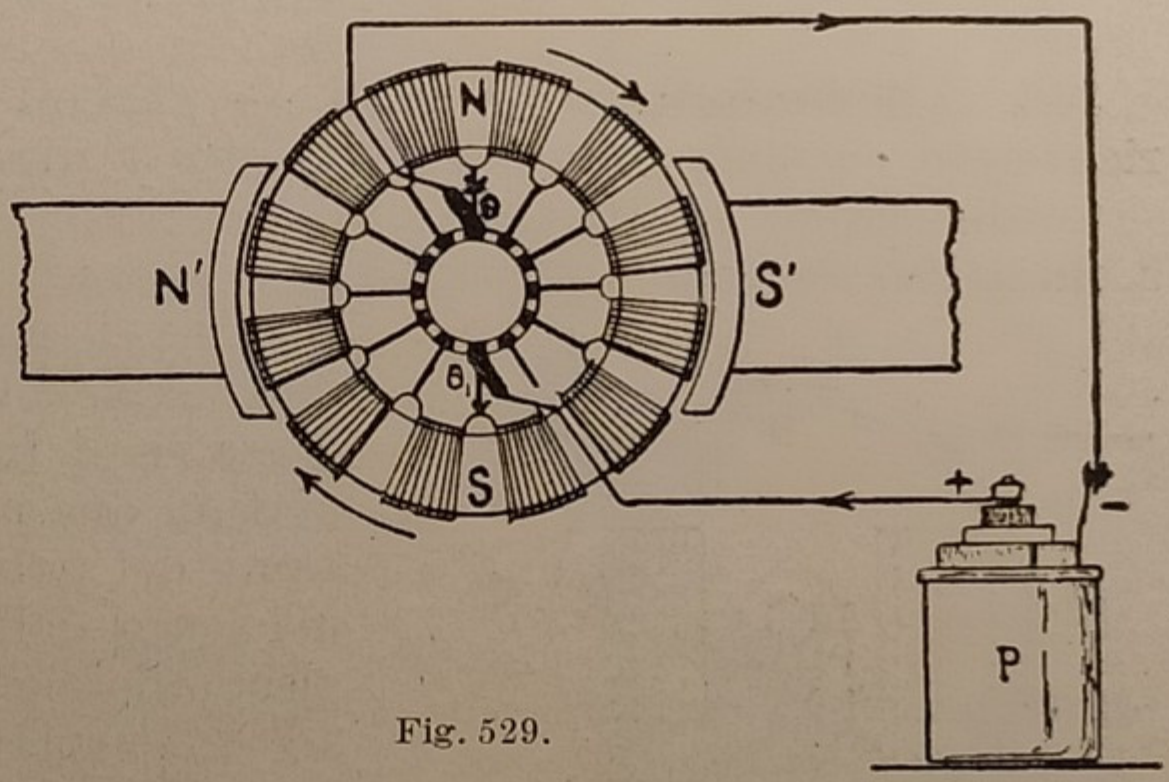


Fig. 529.

Esaminiamo ora l'armatura del Pacinotti. Supponiamo dapprima di avere un mezzo-anello di ferro NAS (Fig. 528), circondato da filo di ramo isolato, in cui passi la corrente; esso forma un'elettrocalamita coi due poli N ed S. Un altro mezzo-anello $N'BS'$ che riceva anch'esso corrente con un avvolgimento *in senso contrario* al precedente, si magnetizza anch'esso con poli concordanti col precedente, in N' ed S'.

Se ora i due mezzi anelli formano un pezzo solo, si trovano nelle stesse condizioni dell'armatura di Pacinotti, (Fig. 529). Se in questa mettiamo le due spazzole O ed O_1 in comunicazione coi reofori di un generatore P di corrente continua, questa entra, p. es., dalla spazzola O_1 nell'avvolgimento, dividendosi in due parti eguali: l'una circola nel mezzo anello di destra, l'altra nel mezzo anello di sinistra; poi le due correnti si riuniscono nella spazzola O e di qui ritornano insieme al generatore.

Ma allora i due mezzi-anelli costituiscono due elettrocalamite, le quali, come s'è spiegato avanti, si fondono in un'unica elettrocalamita, coi due poli N ed S in corrispondenza dei punti ove entra ed esce la corrente nell'armatura. Avviene l'attrazione fra questi poli e quelli del magnete $N'S'$ e l'anello si mette a girare nel senso della freccia.

Se la corrente entrasse nell'armatura sempre dalle medesime sezioni, questa allorchè N fosse arrivato di faccia ad S', cioè dopo un quarto di giro, si fermerebbe. Ma essendo le spazzole fisse e girando l'armatura insieme al collettore, la corrente entra via via in questo per le successive lamine, man mano che esse arrivano sotto la spazzola; quindi, comunque giri l'anello, i poli N ed S si spostano continuamente indietro altrettanto di quanto esso ha girato, cioè rispetto allo spazio circostante *si formano permanentemente nella stessa posizione* e la rotazione dell'armatura è continua.

In pratica il magnete $N'S'$ è un'elettrocalamita, alimentata dallo stesso generatore che alimenta l'armatura, ed inserita in uno dei tre modi indicati nel § 335, quando ora s'intenda che r delle Figg. 512-514 rappresenti il generatore di corrente che alimenta il motore.

Un motore elettrico teoricamente richiede la potenza di 736 w per ogni HP prodotto; in pratica un po' più per le solite perdite nella trasformazione dell'energia. Il rendimento massimo di un buon motore è del 92 %, cioè per ogni HP di potenza effettivamente sviluppata, esso assorbe:

$$(736 : 0{,}92)\, w = 800\, w.$$

345. **Alternomotori sincroni.** — Anche l'alternatore è invertibile; cioè ricevendo corrente alternata, si mette a girare.

Consideriamo infatti la Fig. 530, che rappresenta un'armatura Siemens, a cui arrivi corrente alternata per le spazzole P e P' e per due anelli, anzichè per il solito commutatore [1]. Ad un dato istante la corrente arriva in un certo senso, e si formeranno nel nucleo dell'armatura due poli N' ed S'; onde per l'attrazione dei poli N ed S avviene la rotazione nel senso della freccia. Dopo un quarto di giro, allorchè N' fosse arrivato di fronte ad S, l'armatura dovrebbe fermarsi; ma supponiamo che proprio in quell'istante la corrente, *poichè è alternata*, s'inverta di senso; allora al posto di N' si forma un polo Sud, e l'armatura compie un altro mezzo giro. Il motore quindi può girare, *purchè le alternazioni della corrente avvengano esattamente ad ogni mezzo giro dell'armatura*, allorchè i poli della parte girante abbiano assunto una determinata posizione rispetto ai poli magnetici fra cui si muove; ossia la velocità di rotazione deve essere in stretto legame con la frequenza della corrente alternata.

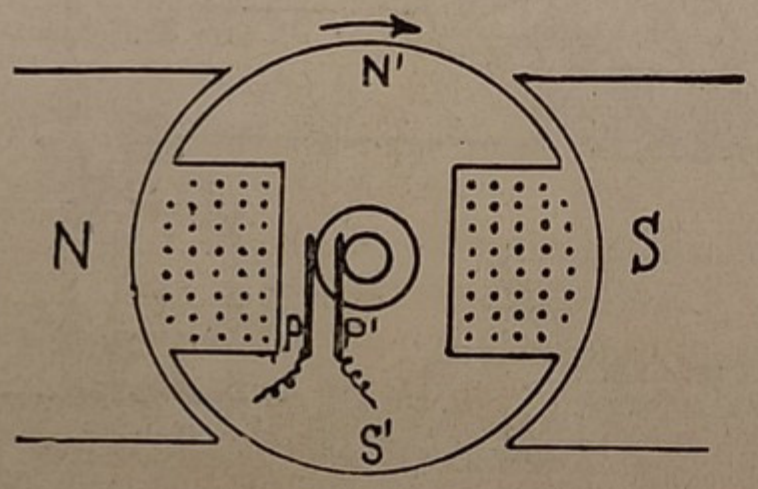


Fig. 530.

Un motore siffatto si chiama **sincrono,** ed in pratica ha il grave inconveniente di non avviarsi da sè alla partenza; e se è già in movimento, un rallentamento dovuto a qualsiasi causa lo fa uscire dal sincronismo e lo fa fermare. Per tale ragione questi motori non hanno avuto diffusione.

346. **Alternomotori asincroni.** — Un motore asincrono, in cui il numero dei giri non sia legato alla frequenza della corrente, potrebbe essere ancora il motore a corrente continua, con collettore, già descritto nel § 344;

---

(1) I due anelli nella Fig. 530 abbiamo dovuto indicarli *uno dentro* l'altro, mentre sono eguali, *uno accanto all'altro*.

purchè il campo induttore sia formato da un'elettrocalamita. Si osservi infatti che se in tal motore si inverte il senso della corrente (collegando col polo — quella spazzola che prima comunicava col polo + del generatore, e viceversa) *l'armatura gira sempre nel medesimo senso;* perchè s'invertono i poli N' con S' ma contemporaneamente anche N con S e l'attrazione fra di essi si mantiene come prima. Tale motore perciò funzionerà anche se la corrente s'inverte continuamente, com'è quella alternata.

Ma per fenomeni d'induzione che non approfondiamo, il motore perde in rendimento ed avviene un forte scintillio alle spazzole; onde non si può costruire per grandi potenze. Si fabbricano solo motori piccoli, quali, ad es., quelli dei ventilatori, delle macchine da cucire, ecc.; purchè l'eccitazione del campo induttore si faccia *in serie*, come nel 1° caso del § 335.

Non essendo questi alternomotori adoperabili per grandi potenze, come si richiede nell'industria, non si sarebbero potute applicare su vasta scala le correnti alternate, che pure sono le sole adatte per il trasporto dell'energia a distanza (§ 351). Onde non si avrebbero oggi i grandiosi impianti di produzione e trasporto di energia elettrica, se Galileo Ferraris [1] scoprendo nel 1884 il **campo magnetico rotante**, non avesse trovato il modo di costruire alternomotori asincroni di grande potenza e di ottimo funzionamento. Pertanto questa nuova scoperta è importantissima quanto quella della dinamo; onde dobbiamo esser fieri di affermare che le maggiori scoperte nel campo dell'elettricità (la *pila*, la *dinamo*, l'*alternomotore*, ed aggiungeremo in seguito la *radiotelegrafia*), sono dovute al genio italiano.

347. **Campo magnetico rotante.** — Diamo un breve cenno su questo importante argomento.

Intendiamo per **campo magnetico rotante** un campo magnetico, la cui direzione nord-sud ruoti continuamente.

Esso si potrebbe ottenere semplicemente facendo ruotare una calamita permanente NS intorno ad un asse AB, (Fig. 531). Ma si tratta di ottenere lo stesso effetto *senza far ruotare alcun organo materiale;* cioè col semplice passaggio di correnti elettriche opportune in circuiti fissi.

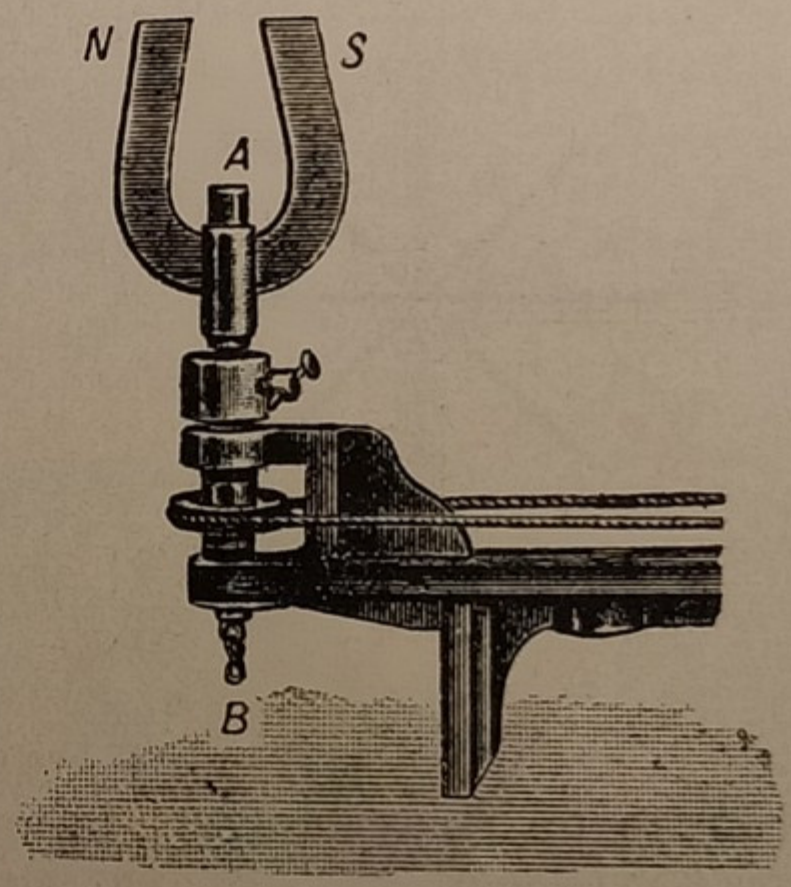


Fig. 531.

Supponiamo di prendere due rocchetti T_1 e T_2 (Fig. 532), formati con filo di rame isolato, avvolto su apposito sostegno; le spire dei due rocchetti siano in piani tra loro perpendicolari. Rappresentiamo meglio i due rocchetti più schematicamente come in Fig. 533. Nel rocchetto T_1 si trasmetta l'una ed in T_2 l'altra delle due correnti alternate, spostate di fase di un quarto di periodo, che insieme formano la **corrente bifase** (§ 342). Queste due correnti sono rappresentate durante un periodo nella Fig. 534; la cor-

(1) Ferraris Galileo; n. a Livorno (Vercelli) nel 1847, m. a Torino nel 1897.

rente 1ª vada nel rocchetto T_1 e la 2ª nel rocchetto T_2. Dividiamo il periodo 0-8 in otto ottavi 0–1–2....8.

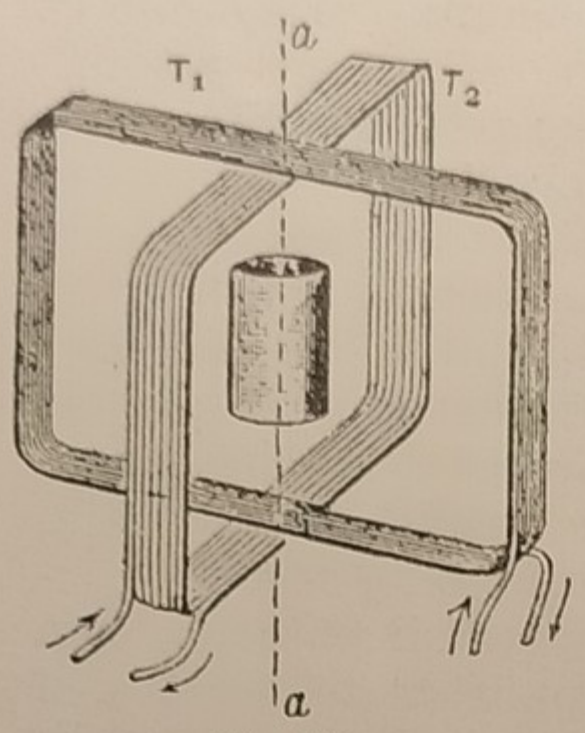


Fig. 532.

All'inizio del periodo, cioè in 0, la corrente 1ª è zero, la 2ª ha il valore massimo rappresentato dal segmento OI_0, in un dato senso che assumeremo come *negativo*. In tale istante perciò in T_1 non vi è corrente, mentre in T_2 passa una corrente in un certo senso (negativo). Ricordiamo (§ 300) che un rocchetto percorso da corrente, come un solenoide, genera un campo magnetico, coi poli sulle due facce del rocchetto, cioè in direzione perpendicolare al piano delle sue spire; quindi in tale istante T_2 genera un campo magnetico, ad es. nella direzione ON_0, (Fig. 533).

Dopo un ottavo di periodo, cioè nel punto 1, la corrente 2ª è ancora negativa, ma di intensità $1I_1$ minore di OI_0; cioè T_2 genera un campo ancora in direzione ON_0, ma di intensità minore; rappresentiamolo col segmento OA (Fig. 535) intendendo che la lunghezza del segmento sia proporzionale all'intensità del campo; ossia rappresentiamo il campo magnetico in direzione ed intensità come se fosse una forza (Vol. 1° - § 50). Ma la corrente 1ª nello stesso

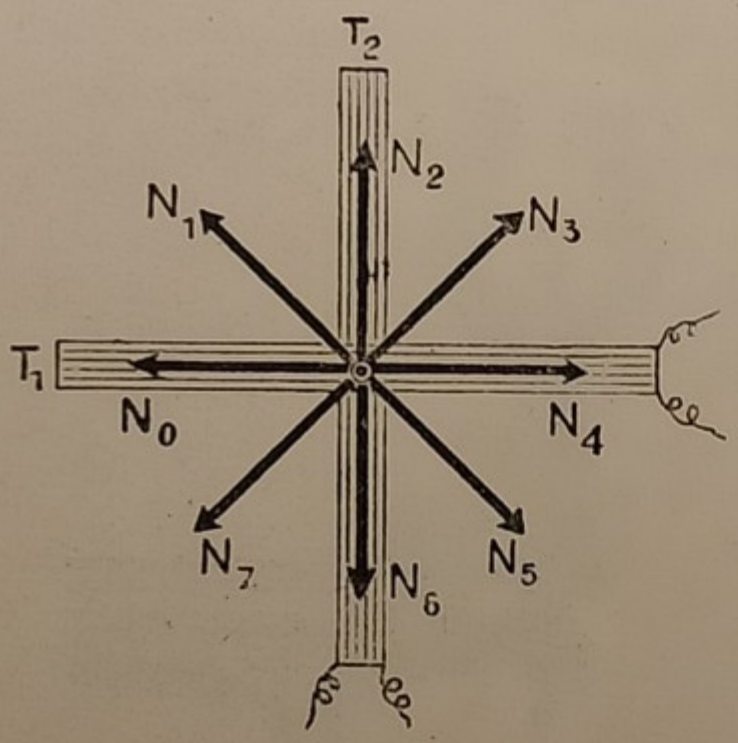


Fig. 533.

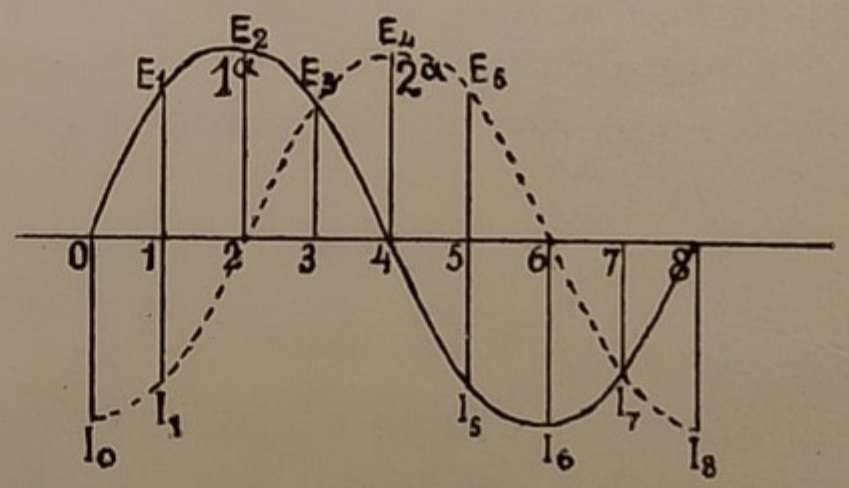


Fig. 534.

istante ha un valore $1E_1$, in un senso che assumeremo come *positivo*; anche in T_1 vi è corrente, ed esso genera un campo magnetico in direzione perpendicolare al suo piano, che rappresenteremo con il segmento OB. *Sussistono in tale istante due campi magnetici OA ed OB, che si compongono in uno solo con la stessa regola del parallelogrammo applicata per la composizione delle forze* (Vol. 1° - § 54); i due campi cioè ne formano *uno solo risultante*, nella direzione intermedia ON', *di intensità* che si dimostra *eguale ad* ON_0 [1]. (Riportiamo ON' in ON_1 nella Fig. 533).

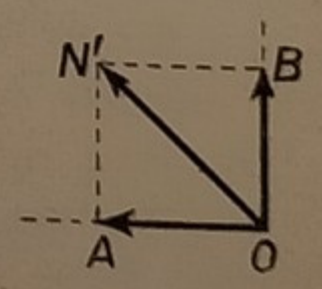


Fig. 535.

Dopo un quarto di periodo, cioè nel punto 2, la 2ª corrente è zero; la 1ª di valore $2E_2$ è massima positiva; il campo è solo prodotto da T_1 in direzione e intensità ON_2.

---

(1) Galileo Ferraris appunto giunse alla sua scoperta, pensando che i campi magnetici potessero comporsi come se fossero delle forze.

Dopo tre ottavi di periodo, cioè nel punto 3, la corrente 1ª di valore $3E_3$ positiva, produce ancora un campo nella direzione ON_2; la corrente 2ª anch'essa di valore $3E_3$ è pure positiva e T_2 genera sempre un campo perpendicolare al suo piano, ma di verso contrario a quello generato all'inizio del periodo; cioè in direzione ON_4 anzichè ON_0. Il campo risultante dalla composizione di questi due è nella direzione ed intensità ON_3.

Dopo mezzo periodo, cioè nel punto 4, la corrente 1ª è zero, la corrente 2ª è massima positiva; il campo è generato solo da T_2 in direzione ON_4.

Dopo cinque ottavi di periodo, cioè nel punto 5, la corrente 2ª positiva genera un campo nella direzione ON_4; ma la corrente 1ª negativa genera un campo in direzione ON_6 (opposto ad ON_2) e i due campi si compongono in uno solo ON_5.

Dopo sei ottavi di periodo, cioè nel punto 6, la corrente 2ª è zero, la 1ª massima negativa, e T genera un campo ON_6

Dopo sette ottavi di periodo, cioè nel punto 7, entrambe le correnti sono negative; la 1ª genera un campo in direzione ON_6, la 2ª in direzione ON_0 e ne risulta un sol campo ON_7.

Finalmente, dopo otto ottavi di periodo, cioè compiuto l'intero periodo, si ritorna come al punto di partenza, con un campo ON_0.

Quindi durante un periodo si è prodotto tra i due rocchetti *fermi, un campo magnetico di intensità costante, la cui direzione ha ruotato di un giro:* a scatti nella spiegazione fatta, ma in realtà con moto continuo ed uniforme, perchè le due correnti variano con continuità.

Se la corrente bifase circola continuamente nei due rocchetti, cioè i periodi si susseguono continuamente, si genera adunque **un campo magnetico rotante, che compie un giro ad ogni periodo.**

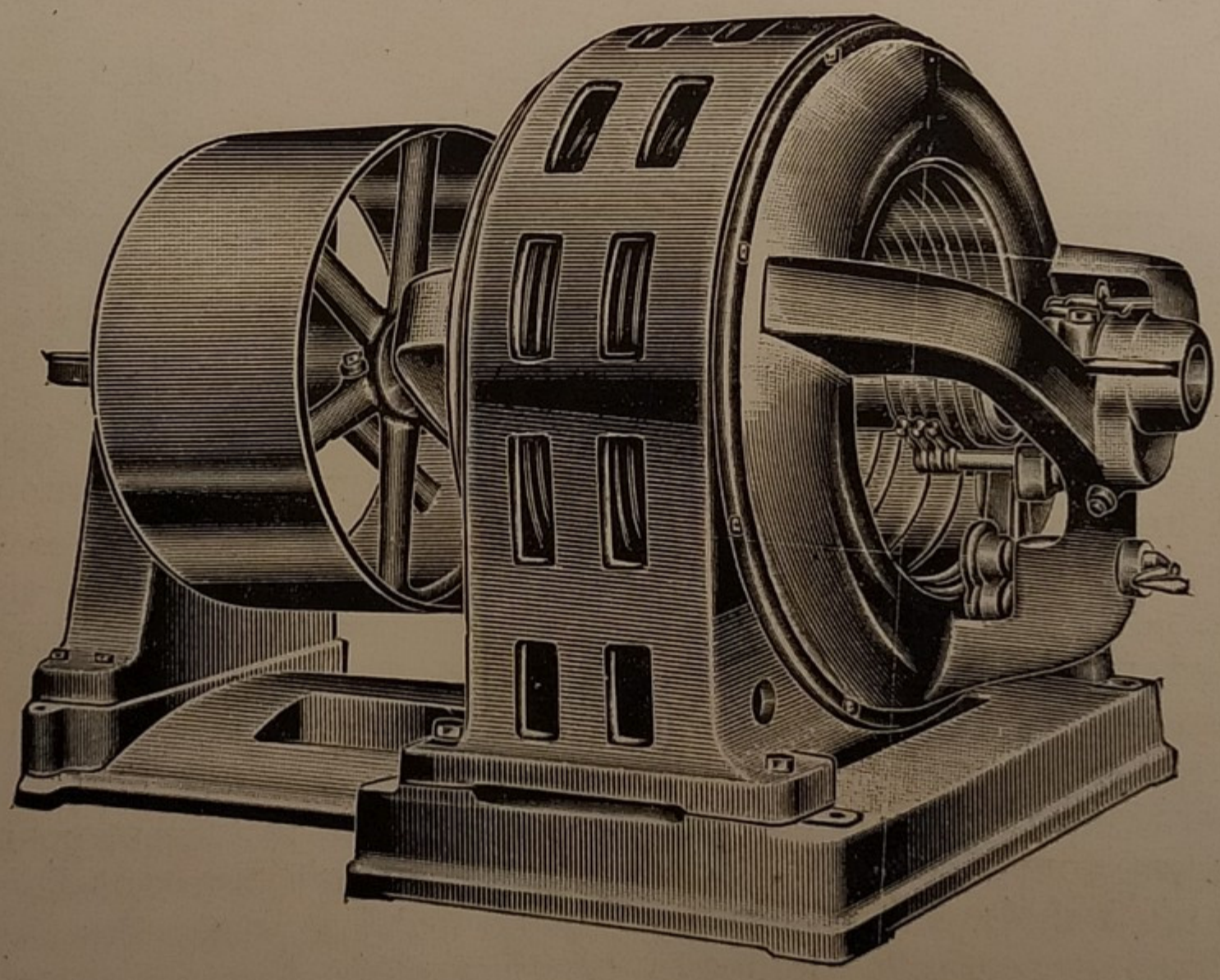


Fig. 536.

348. **Motore a campo magnetico rotante.** — Per utilizzare il principio precedente nella costruzione di un alternomotore, si immagini di collocare in mezzo ai due rocchetti un magnete girevole su di un perno; esso si orienterebbe nella direzione del campo rotante e girerebbe con questo, producendo movimento. Ma girerebbe al sincronismo col campo rotante e quindi ricadremmo nell'inconveniente dei motori sincroni (§ 345).

Se però collochiamo in mezzo ai due rocchetti un conduttore qualsiasi, p. es., un cilindro di rame, che possa ruotare attorno ad un asse *a a* (Fig. 532), la rotazione del campo provoca attraverso questo conduttore continue variazioni di flusso magnetico, e quindi correnti indotte; queste generano nel cilindro un campo magnetico proprio che è trascinato dal campo magnetico rotante. Cioè *il conduttore si mette a girare*; ma non occorre più che esso giri al sincronismo.

Nella pratica, per la solita ragione di creare campi magnetici più intensi, i rocchetti sono sostituiti da avvolgimenti eseguiti su nuclei di ferro, e formano la parte fissa del motore, detta **statore**; il conduttore interno è anch'esso formato da bacchette di rame o avvolgimenti eseguiti su un altro nucleo di ferro, e formano la parte girante o **rotore.**

Anzichè con la corrente bifase oggi il campo rotante si produce con la corrente trifase, che ha sulla prima parecchi vantaggi; naturalmente anzichè due avvolgimenti lo statore ne avrà tre, a 120° uno con l'altro, uno per ciascuna fase della corrente. La necessità del campo rotante per i motori asincroni, spiega perchè sia oggi tanto diffusa la corrente trifase.

La Fig. 536 mostra un grande alternomotore asincrono da 350 *HP*.

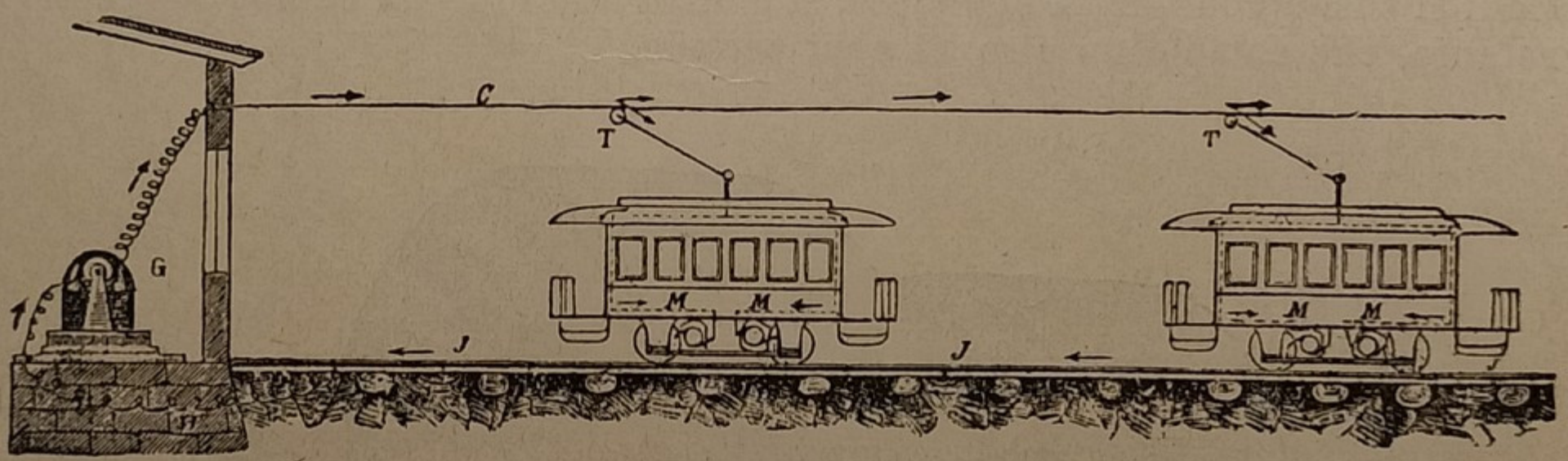


Fig. 537.

349. **Trazione elettrica.** — I motori elettrici per la loro comodità, facilità di manovra e di regolaggio e per il poco costo dell'energia elettrica che li fa agire, sono molto adoperati negli opifici e nelle officine. Sono stati anche impiegati per la **trazione elettrica,** cioè per mettere in moto vetture tramviarie, ferroviarie, ecc.

Per il *tram* si fa uso di un'officina centrale, da cui parte la corrente elettrica (solitamente continua), generata da una macchina *G* (Fig. 537); la corrente si trasmette ad un filo isolato *C*, quasi sempre aereo, posto ad una certa altezza sopra le rotaie. Su questo filo poggia una rotella *T*, detta **trolley,** o un **archetto** di metallo, portata da un'asta posta sopra la vettura; essa conduce la corrente ai motori elettrici *MM* posti sotto la vettura, i quali trasmettono il moto alle ruote. La corrente ritorna alla generatrice *G*

per mezzo delle rotaie *J*. Il manovratore, agendo sulla manovella del controller, mette in moto il motore, o lo arresta, o ne varia la velocità.

Per la trazione è preferibile la corrente continua, perchè permette l'uso del motore eccitato in serie, che è quello che fornisce un maggior sforzo all'avviamento, come appunto si richiede in questo caso. Ma oggi per le

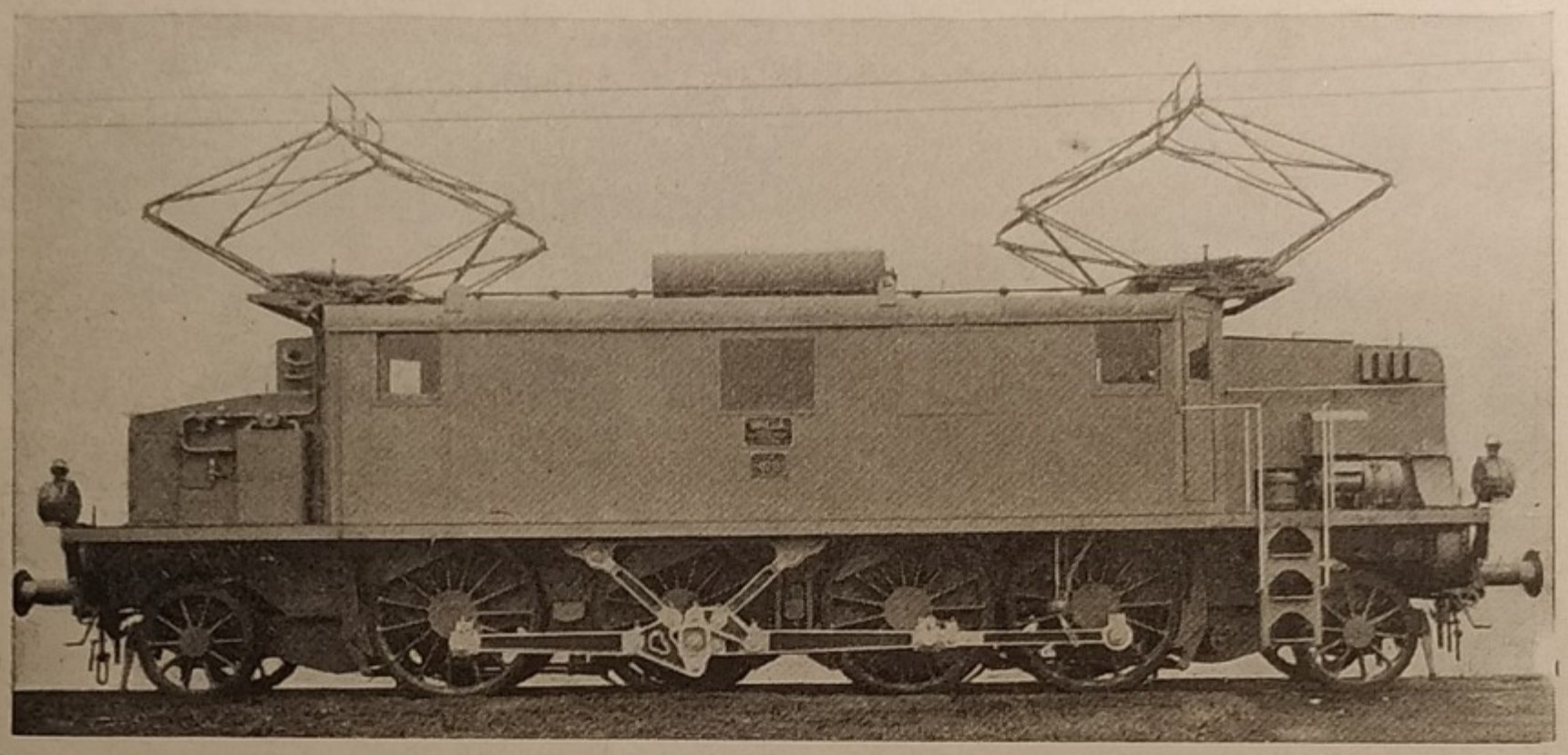


Fig. 538.

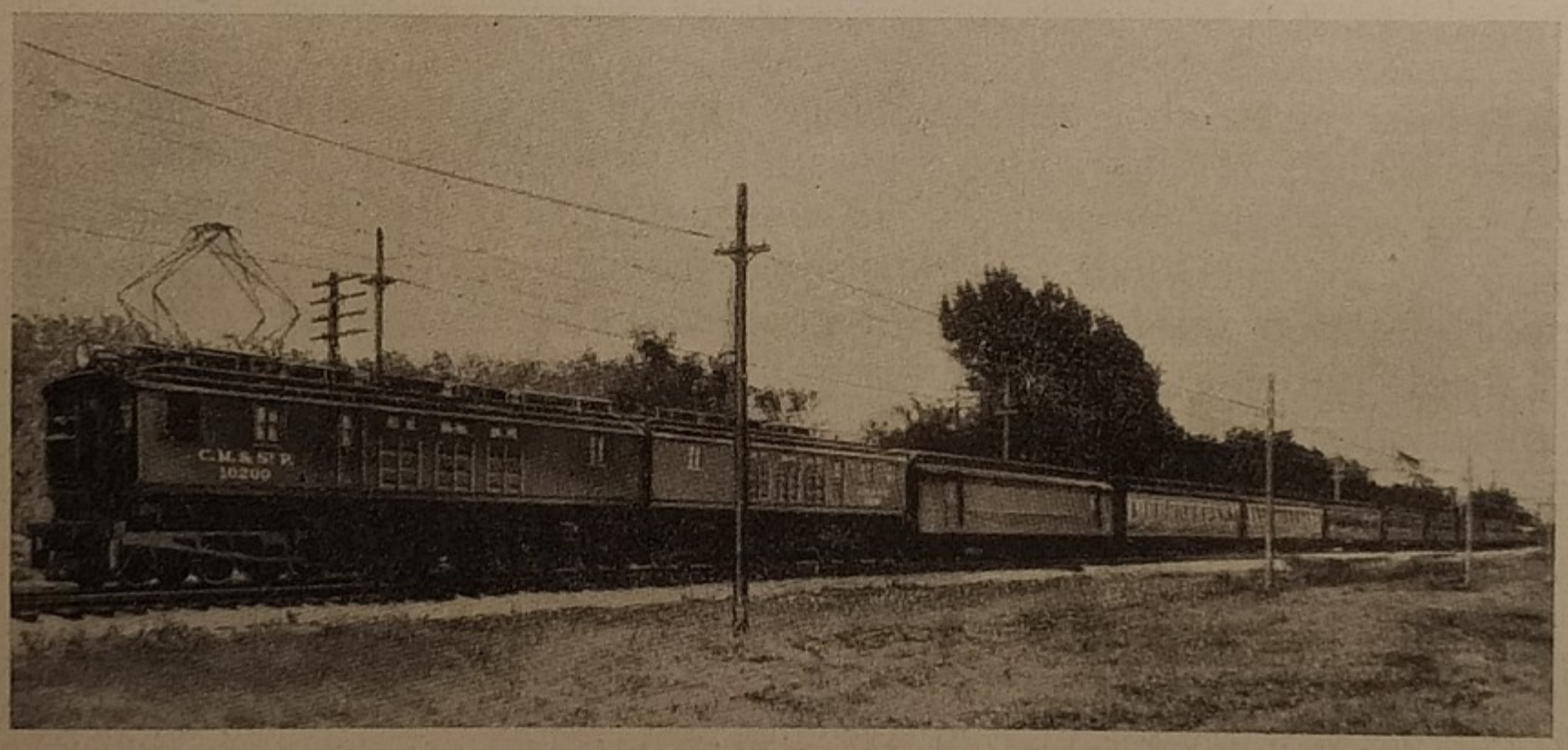


Fig. 539.

ferrovie si va generalizzando l'uso dei motori a corrente alternata, permettendo questa (come vedremo nel capitolo seguente) la distribuzione della corrente a maggiori distanze. La Fig. 538 mostra un *locomotore elettrico* a corrente alternata, e la Fig. 539 un *treno elettrico*.

Si è anche provato ad inviare la corrente alle vetture, anzichè con filo aereo, con una terza rotaia isolata o con una conduttura disposta in un cunicolo sotterraneo; ma si tratta di esperimenti che non hanno avuta molta diffusione. La Fig. 540 mostra la ferrovia elettrica Milano-Varese, a terza rotaia.

Il motore elettrico non conviene per l'automobilismo, perchè l'energia elettrica necessaria pel suo funzionamento dovremmo trasportarla con accumulatori, che (come accennammo al § 267) sono molto pesanti. Tuttavia in qualche caso esso è stato applicato; come, ad es., per omnibus da albergo, innaffiatrici stradali, ecc., per i quali la velocità e il raggio d'azione sono limitati e quindi non eccessivo il peso della batteria da trasportare.

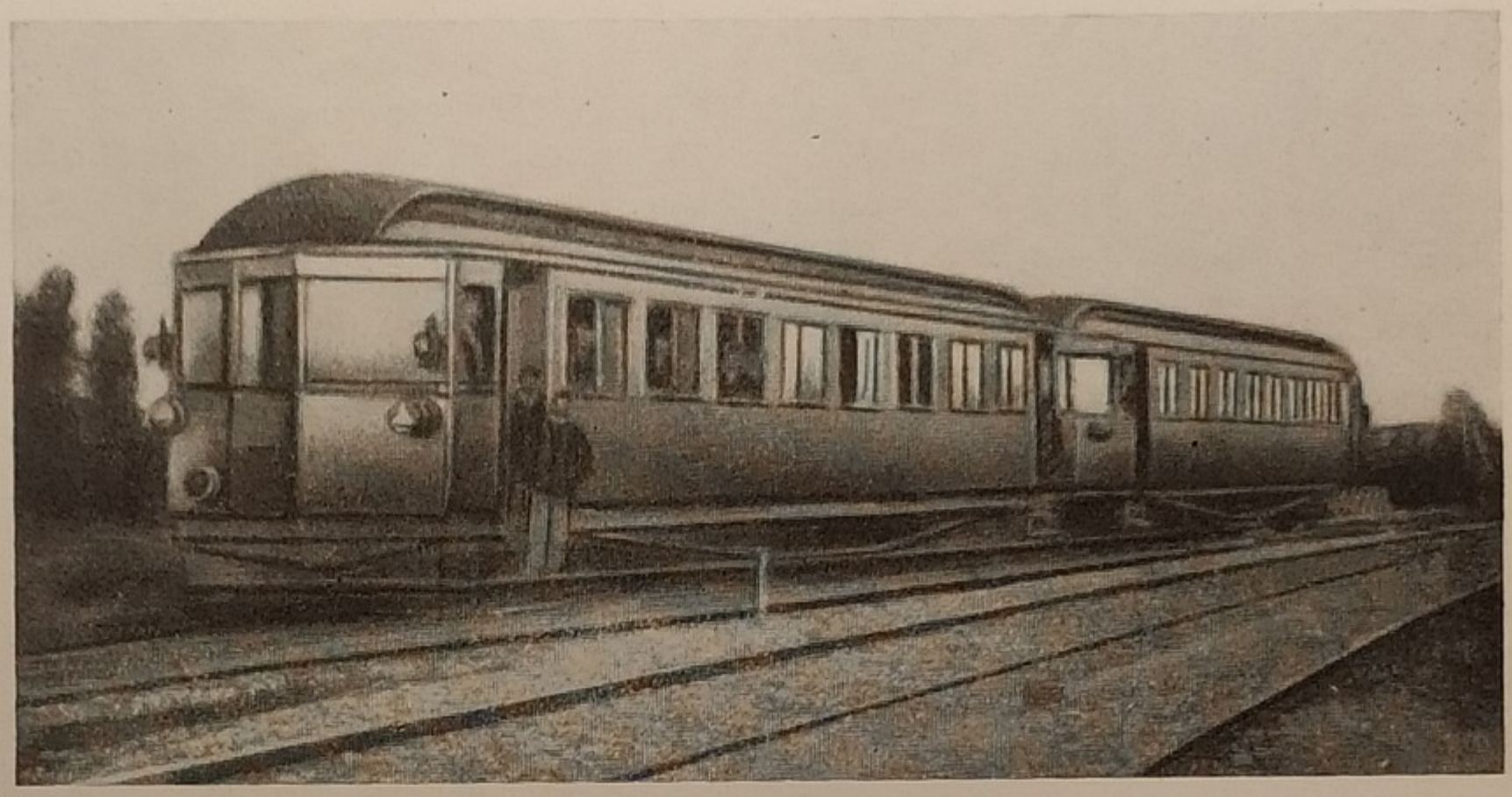


Fig. 540.

Il motore elettrico conviene anche per la propulsione dei sommergibili sott'acqua; infatti allora non è possibile l'uso dei motori a scoppio, per la scarsezza dell'aria necessaria ad alimentarli, e per la difficoltà dello scarico dei prodotti della combustione. I sommergibili hanno appunto un motore elettrico sussidiario, alimentato da una batteria di accumulatori, che si caricano allorchè il sommergibile viene a galla, per mezzo di una dinamo comandata dal motore a scoppio che fa muovere ordinariamente la nave.

Problema. — *Calcolare una batteria di accumulatori per un automobile da 15 HP, che possa andare per 3 ore senza ricaricarsi.*

Soluzione. — Si può fissare la tensione del motore a piacere; supponiamo che sia: $V = 50$ *volt*. Per fornire tale tensione sino alla scarica, cioè sino alla tensione di 1,8 V per elemento (§ 267), il numero di questi dev'essere:

$n = \frac{50}{1{,}8} = 28$. La potenza di 15 *HP*, ammesso il rendimento totale dell'85 %, corrisponde a:

$$W = (15 \times 736 : 0{,}85)\ watt = 13\,000\ w.\ \text{circa}.$$

L'intensità della corrente di scarica è perciò:

$$I = \frac{W}{V} = \frac{13\,000}{50}\ amp. = 260\ amp.$$

Se la scarica deve durare 3 ore, la capacità della batteria dev'essere:

$$C = (260 \times 3)\ amp\text{-}ora = 780\ amp\text{-}ora.$$

Si cercherà nei listini dei fabbricanti di accumulatori, qual'è il tipo di elemento che corrisponde a tale dato.

Gli accumulatori più leggeri esistenti in commercio, hanno la capacità di circa: $c = 15$ *amp-ora* per chilogrammo (compresi i recipienti ed il liquido); quindi per ottenere la capacità richiesta la batteria peserà:

$$P = \frac{C\,n}{c} = \text{kg.}\,\frac{780 \times 28}{15} = \text{kg. } 1456.$$

Cioè bisognerebbe più che raddoppiare il peso di una vettura a benzina odierna, pur avendo un'autonomia limitata di 3 ore, e l'inconveniente di dover attendere qualche ora per la ricarica della batteria. Si aggiunga la poca durata della batteria (un centinaio di scariche) e il costo elevato, e si ha la spiegazione della causa per cui oggi l'automobilismo elettrico non può essere applicato, malgrado i pregi grandissimi del motore elettrico, rispetto a quello a scoppio.

Problemi da risolvere.

1. Che intensità di corrente occorre, con la tensione di 220 *V*, per azionare un elettromotore di 50 *HP*, il cui rendimento sia del 92%?

2. Quanti *HP* si possono ottenere in un alternomotore monofase che funzioni con corrente a 150 *V* e 25 *amp*, se il rendimento è dell'87% e il fattor di potenza 0,82?

3. Con lo stesso procedimento del § 347, l'alunno provi a studiare la formazione del campo rotante con corrente trifase, partendo dalla rappresentazione di questa data in Fig. 523. Si tenga presente che nella corrente trifase ad ogni istante la *f.e.m.* di ciascuna fase è uguale e contraria alla somma delle altre due.

4. Per il funzionamento del macchinario di un opificio occorrono:

10	motori	da	2 *HP*,	rendimento	85%,	cos φ	= 0,80
5	»	»	5 »	»	87%,	»	= 0,82
2	»	»	15 »	»	89%,	»	= 0,85

tutti agenti con corrente trifase a 500 *V*, per ore 8 giornaliere. Calcolare: l'intensità di corrente occorrente per tutto l'impianto, ed il costo giornaliero di esercizio, se l'energia elettrica si paga a L. 0,30 il *kwo*.

Trasporto dell'energia a distanza.

350. **Le energie naturali.** — La massima parte dell'energia elettrica impiegata oggi nell'industria e nelle abitazioni, non è prodotta nella stessa città; essa è generata a parecchie decine di chilometri di distanza, in luoghi ove siano cascate d'acqua che scende dai monti, per potere sfruttare la loro potenza. Quest'energia così ottenuta costa pochissimo ed è abbondante nel nostro paese; costituisce il così detto **carbone bianco** (Fig. 541), ed è una risorsa preziosa che ha permesso all'Italia, ricca di energia idraulica, di gareggiare nelle industrie con le nazioni che posseggono il carbon fossile. È infatti in virtù di questo minerale che le altre nazioni potevano ottenere con le macchine a vapore la forza motrice a buon mercato, per azionare i loro opifici; mentre esso manca quasi del tutto in Italia.

Il potere sfruttare in città l'energia naturale delle acque che scendono dai monti, è il così detto problema della **trasmissione dell'energia a distanza.** La risoluzione di questo problema appare facile a prima vista: L'acqua della

cascata condotta in una turbina idraulica, genera forza motrice, la quale viene impiegata a muovere una dinamo; la corrente generata da questa, per mezzo di fili di rame, è condotta lontano in città, ove si sfrutta per luce, forza motrice, ecc.

Ma nel primo esperimento fatto nel 1883 da Depretz-D'Arsonval in Francia, su un

Fig. 541.

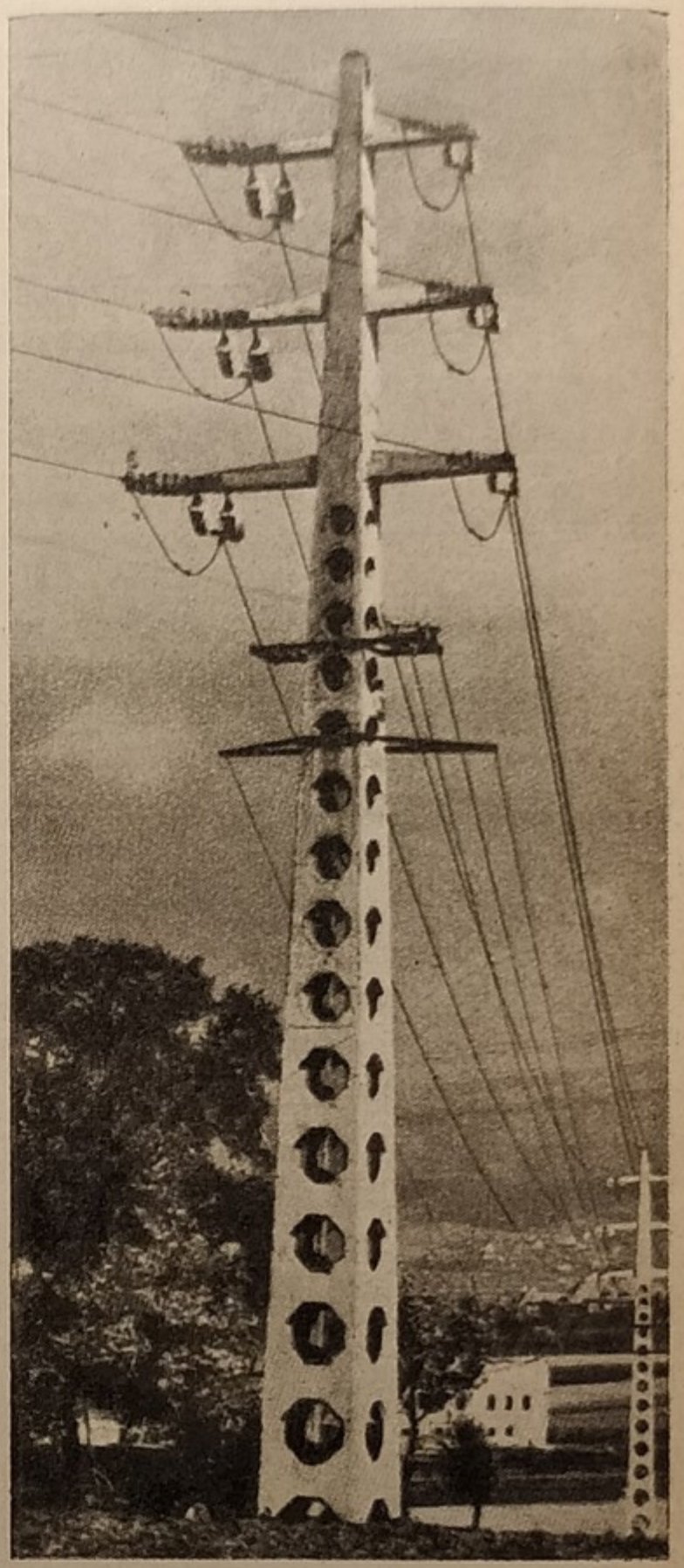


Fig. 542.

percorso di 14 chilometri, non arrivò a destinazione che una piccola parte dell'energia trasmessa: la maggior parte si disperse nella linea a causa della resistenza di questa, sotto forma di calore svolto dalla corrente.

351. **Scelta della corrente.** — Per ridurre al minimo le perdite della linea, ricordando per la legge di Joule (§ 282), che il calore svolto dalla corrente è proporzionale ad i^2 ed r, occorre diminuire o la resistenza r della linea o l'intensità i della corrente trasmessa. Ma per diminuire la resistenza occorrerebbe impiegare fili molto grossi, cioè non possibili nella pratica per l'enorme costo e la difficoltà di sostenerli. È più conveniente pertanto diminuire l'intensità della corrente.

Ora, per trasmettere una data potenza, ricordando che questa è misurata dal prodotto $e\,i$ (§ 280), se diminuisce i bisogna in compenso aumentare e

nella stessa proporzione; ecco quindi *la necessità di impiegare correnti ad alto potenziale*. Più s'innalza il potenziale, più lontano si può trasmettere l'energia elettrica; il limite in pratica è imposto dall'isolamento della conduttura elettrica. Oggi vi sono impianti nei quali si trasmettono correnti alla tensione di più di 200000 *volt*! La Fig. 542 mostra una linea di trasmissione di queste correnti ad alto potenziale.

Ma queste correnti non si possono generare direttamente con una dinamo, perchè non sarebbe sufficiente l'isolamento tra le varie spire e sezioni dell'avvolgimento; si ricordi che con tali potenziali avvengono scintille di parecchi centimetri di lunghezza, che perforerebbero le coperture isolanti dei fili. E quand'anche si producessero, non sono utilizzabili all'arrivo, sia per la difficoltà dell'isolamento, sia perchè producono la morte, sia perchè non vi sono nè motori nè lampade che funzionino a così alto potenziale. È necessario pertanto alla stazione di partenza generare le correnti a basso potenziale e poi **trasformarle** ad alto potenziale; e viceversa all'arrivo nuovamente trasformarle da alto a basso potenziale, per distribuirle ove si devono utilizzare.

Ora, la corrente continua non si può trasformare che per mezzo dei **trasformatori rotativi**; formati da un motore che riceve la corrente da trasformare, il quale produce forza motrice che fa agire una dinamo, che produce nuova corrente a potenziale diverso da quella ricevuta dal motore. Ma a parte la difficoltà detta di dover far funzionare tali macchine ad alto potenziale, si tratta di macchine in moto, che esigono cioè sorveglianza e manutenzione, e che sono di rendimento non troppo elevato; onde le due trasformazioni consumerebbero inutilmente un buon quarto dell'energia da trasformare.

Invece, per la corrente alternata vi sono **trasformatori statici**, cioè senza movimento, che non esigono sorveglianza, e che consumano per la trasformazione solo il 3 % dell'energia ricevuta.

È questa la ragione per cui oggi sono impiegate generalmente le correnti alternate, per il trasporto dell'energia a distanza.

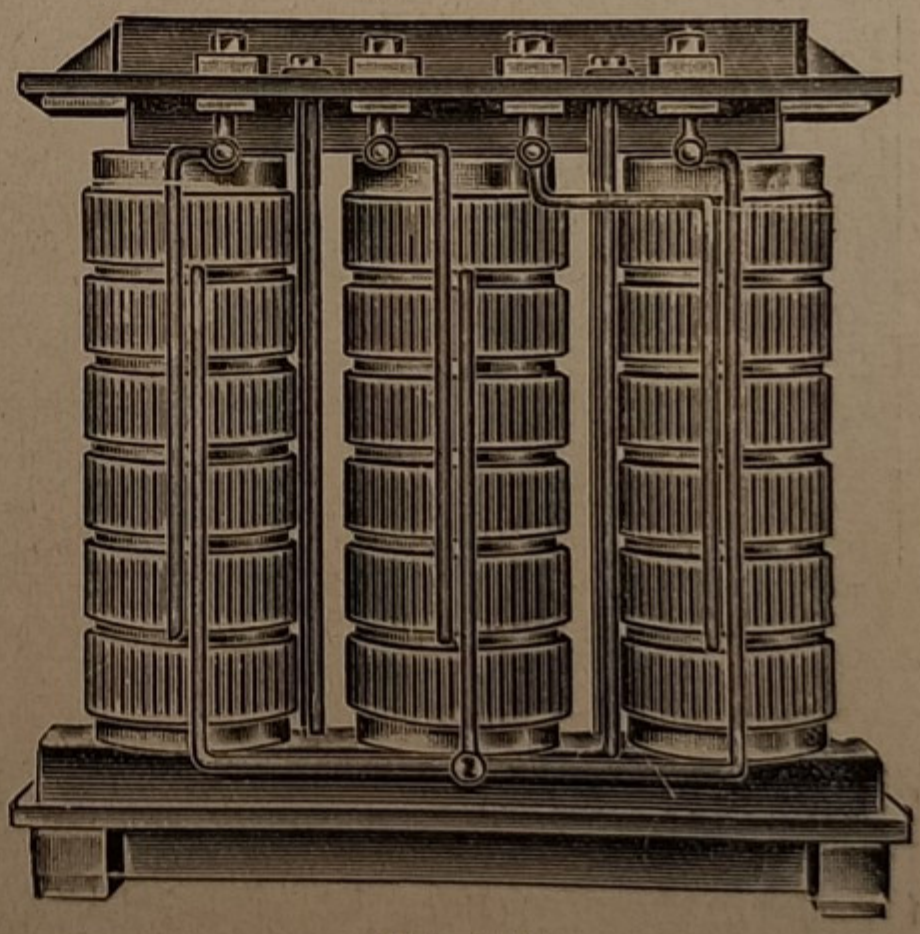


Fig. 544.

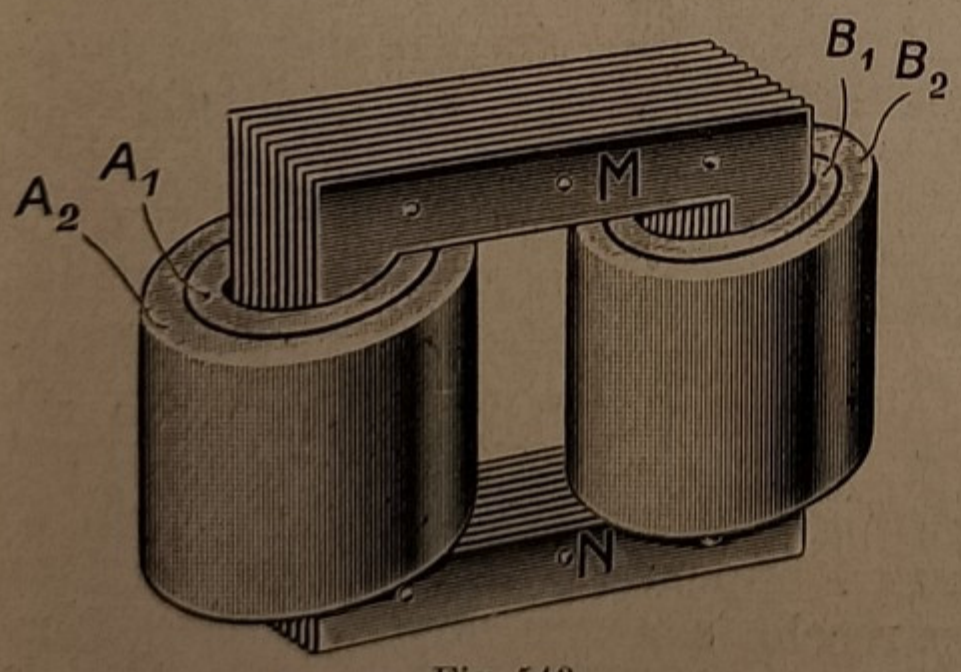


Fig. 543.

352. **I trasformatori statici.** — Questi trasformatori sono basati sul principio del rocchetto di Ruhmkorff (§ 325). Sono formati cioè da un nucleo di ferro dolce, attorno a cui sono disposti due avvolgimenti ben isolati

l'uno dall'altro, che formano il circuito primario l'uno, il circuito secondario l'altro; uno è di poche spire e l'altro di molte. Se nel primo avvolgimento mandiamo una corrente alternata a basso potenziale, essa (senza bisogno dell'interruttore) genera le variazioni di flusso necessarie per produrre nell'altro avvolgimento correnti indotte pure alternate, di eguale periodo, ma di maggior potenziale. Se viceversa si manda corrente ad alto potenziale nell'avvolgimento con più spire, si ottiene nell'altro avvolgimento una corrente a basso potenziale. Nel primo caso il trasformatore **eleva** il potenziale; nel secondo caso lo **abbassa**.

Il **rapporto di trasformazione**, cioè il rapporto tra i *volt* del secondario e quelli del primario, è approssimativamente lo stesso che il rapporto tra il numero delle spire dei due avvolgimenti.

Occorre però che il nucleo del trasformatore non sia rettilineo, perchè il flusso uscente dai poli alle estremità sarebbe in gran parte disperso, e il rendimento sarebbe scarso. Si adoperano oggi nuclei formanti un **circuito magnetico chiuso**, cioè a forma di anello o di rettangolo; così tutto il flusso è integralmente utilizzato nei circuiti del trasformatore.

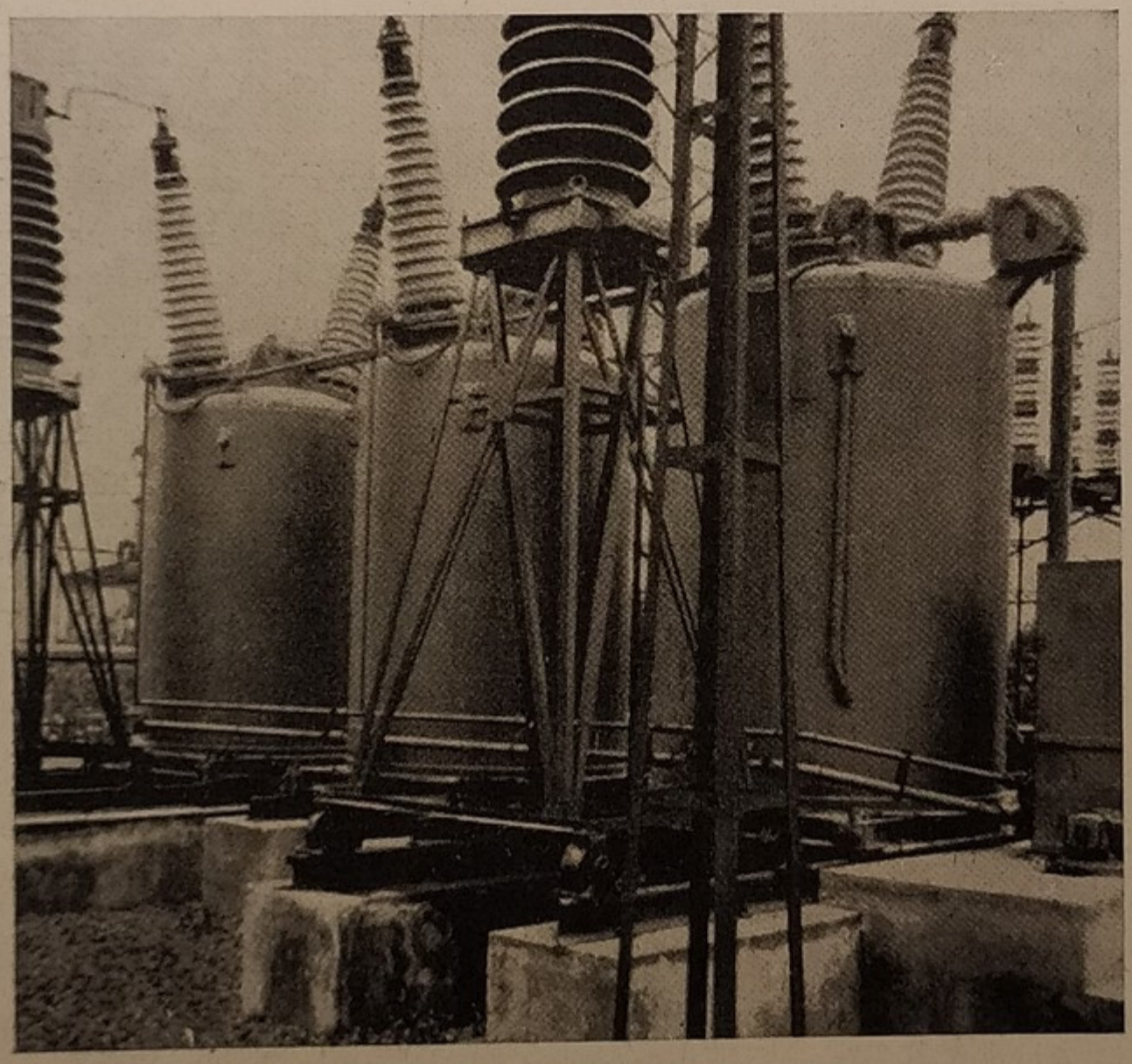


Fig. 545.

La Fig. 543 rappresenta alquanto schematicamente, uno di tali trasformatori; in essa MN è il nucleo, non massiccio ma lamellare come quello dell'armatura della dinamo (§ 336), per evitare le correnti di Foucault; A_1B_1 è il circuito primario e A_2B_2 il secondario, ciascuno diviso in due rocchetti sulle due branche del nucleo.

Per le correnti trifasi si potrebbero adoperare tre di tali trasformatori, uno per ciascuna fase; si adopera più semplicemente un trasformatore il cui nucleo è a tre branche, una per fase, contenenti ciascuna il doppio avvolgimento. La Fig. 544 ne mostra uno di piccola potenza. Per le grandi potenze è invece opportuno tenere separati i tre trasformatori per le tre fasi; gli apparecchi sono racchiusi in grandi recipienti pieni d'olio (isolante) che si fa circolare e opportunamente raffreddare, per evitare un eccessivo riscaldamento del trasformatore. La Fig. 545 rappresenta il gruppo dei trasformatori della sottostazione di Rifredi (Firenze) delle ferrovie dello Stato.

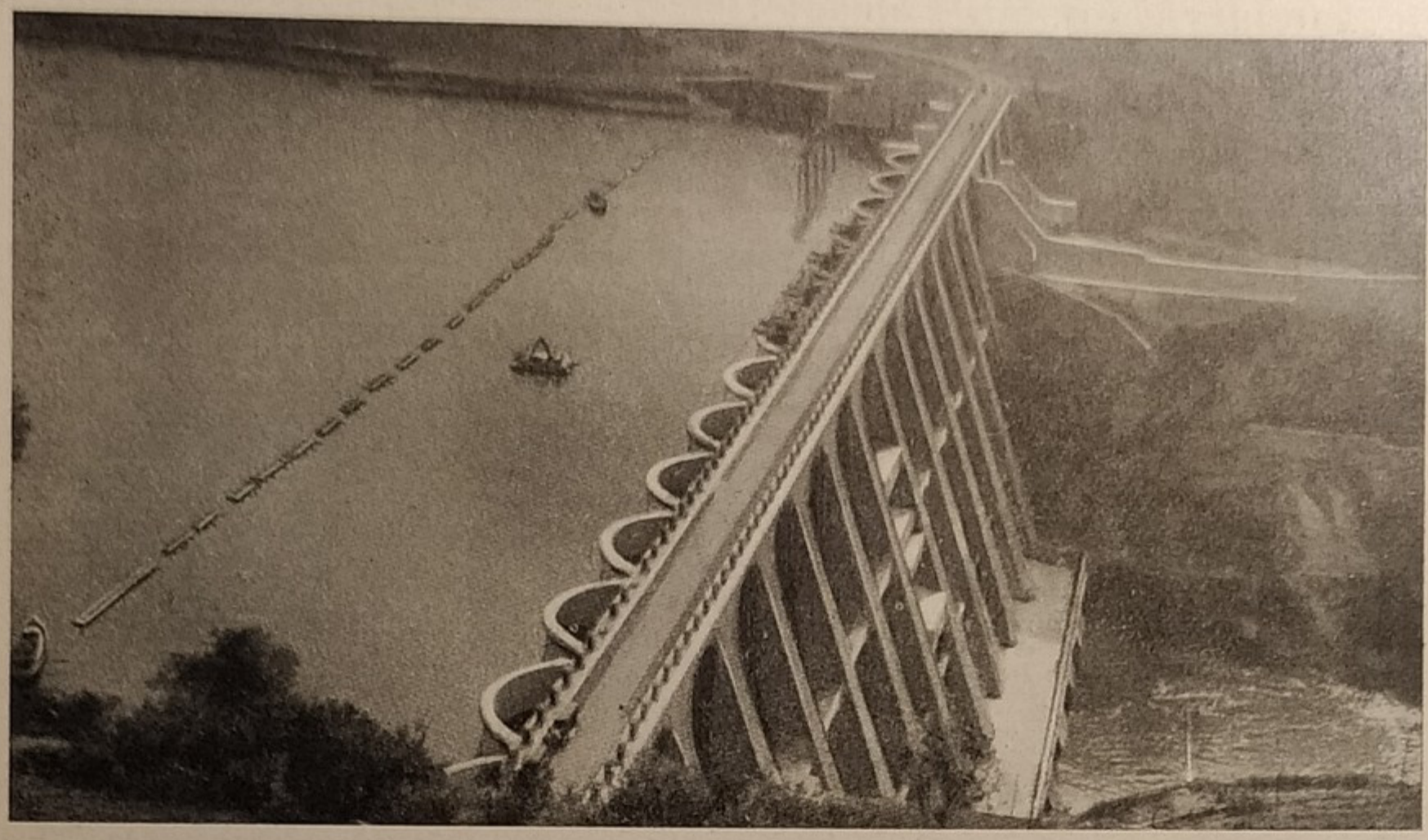


Fig. 564.
546

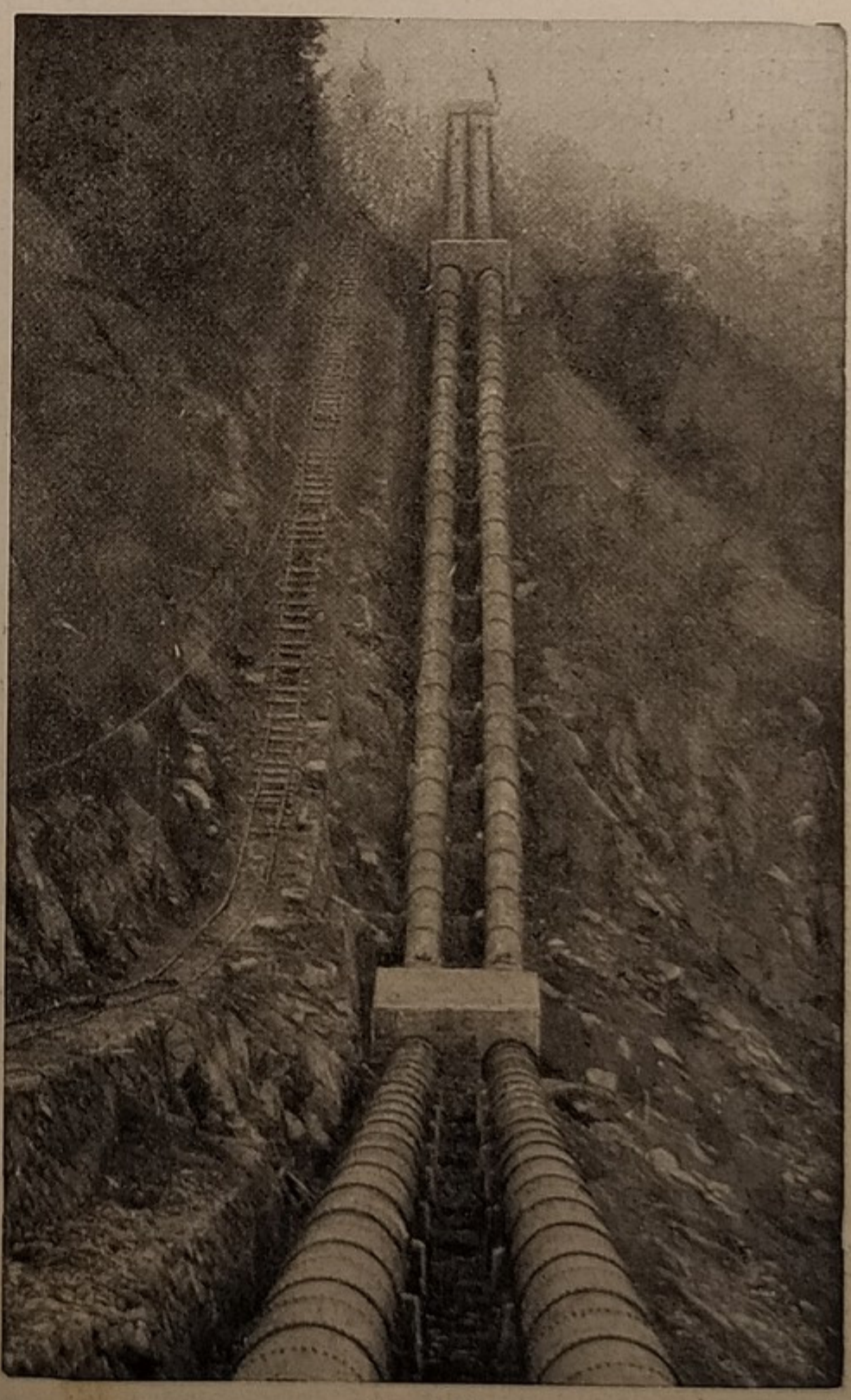


Fig. 547.

Problema. — *Quanti amp. potremo ottenere al secondario di un trasformatore, il cui primario assorbe 10 kw alla tensione di 3000 V, ed il rapporto di trasformazione è di 20 : 1?*

Soluzione. — Siano e ed i tensione ed intensità al primario; e' ed i' i valori corrispondenti al secondario. Per il principio della conservazione dell'energia, sarà teoricamente:

$$e\,i = e'\,i'.$$

Ma in pratica, per le perdite nella trasformazione, se il rendimento dell'apparecchio è del 97%, sarà:

$$e'\,i' = 0{,}97\,e\,i, \quad \text{da cui:} \quad i' = 0{,}97\,\frac{e\,i}{e'}.$$

Nel caso nostro: $\frac{e}{e'} = 20$, $\quad e = 3000\ V$;

quindi: $\quad e' = \frac{3000}{20}\ V = 150\ V.$

Inoltre: $\quad e\,i = 10\,000\ w$; $\quad$ quindi:

$$i' = 0{,}97\,\frac{10\,000}{150}\ amp. = \textbf{65 amp. circa.}$$

353. **I moderni impianti idroelettrici.** — Raramente si trova in natura un salto d'acqua verticale, da poterzi utilizzare direttamente nelle macchine

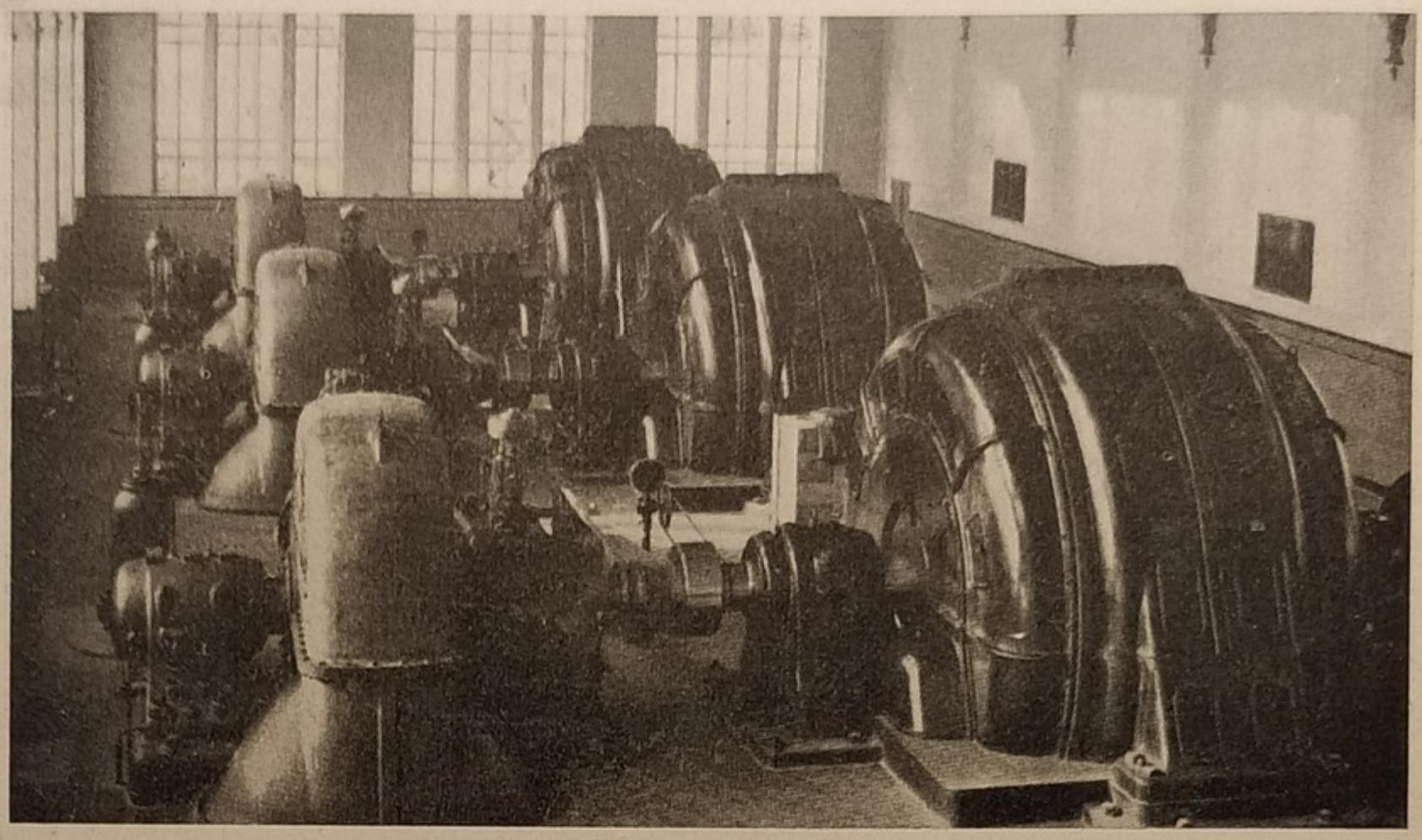


Fig. 548.

idrauliche. Allora il salto lo si crea artificialmente, sbarrando il corso d'acqua con una **diga**; e facendo così salire il livello dell'acqua, in modo da raccoglierla in un **lago artificiale.** Con ciò è possibile ottenere in certe ore del giorno, o in certe epoche di magra dell'anno, portate anche superiori a quella dell'acqua che affluisce nel lago, e quindi aumentare la potenza massima dell'impianto. La Fig. 546 mostra la grandiosa diga del Tirso, in Sardegna, una delle grandi opere del regime fascista, ed un pezzo del lago artificiale da essa creato.

Dal lago l'acqua è convogliata dentro grossi tubi di acciaio, costituenti le **condotte forzate** (Fig. 547, condotte forzate dell'impianto idroelettrico di Susa); all'estremità inferiore delle quali si trovano **le turbine** (Vol. 1° - § 202). Queste ruotano e dànno la forza motrice necessaria per far funzionare gli alternatori. La Fig. 548 mostra un gruppo di turbo-alternatori di una centrale idroelettrica; le turbine sono quelle della fila di sinistra, gli alternatori della fila di destra.

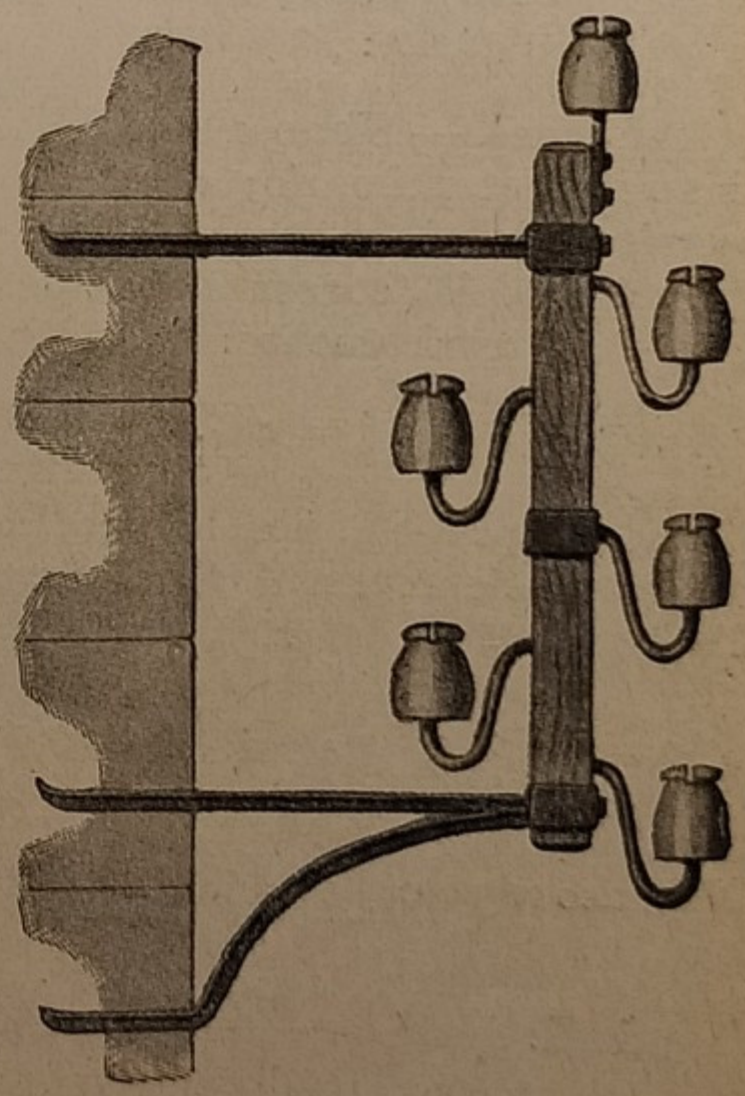


Fig. 549.

354. **Distribuzione dell'energia elettrica.** — Abbiamo detto (§ 268) che la corrente elettrica si distribuisce per mezzo di fili conduttori di *rame elettrolitico*. I fili adoperati per le condutture esterne stradali sono nudi, e sono isolati dal sostegno (palo, parete, ecc.) per

mezzo di *isolatori di porcellana*, sostenuti da mensole opportune (Fig. 549). I fili adoperati nell'interno delle abitazioni, sono isolati con uno strato di gomma vulcanizzata, ed all'esterno con una treccia o un nastro di cotone (Fig. 550);

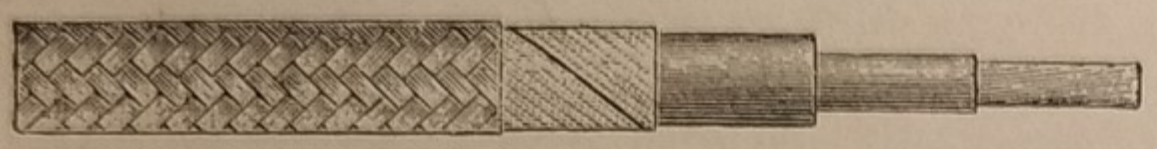


Fig. 550.

Fig. 551.

Fig. 552.

inoltre sono tenuti discosti dalle pareti, per mezzo di *carrucolette* o *morsetti* di porcellana. Spesso si adoperano *cordoncini flessibili* a due conduttori (Fig. 551), fissati al muro per mezzo di morsetti di vetro o di porcellana (Fig. 552). È molto usato oggi il *filo binato*, bene isolato con gomma e con grosso strato di fibre tessili, in modo da potersi fissare direttamente sulla parete per mezzo di piastrine di metallo, senza bisogno di isolatori.

Vi sono due modi principali per collegare le lampadine ai conduttori della corrente elettrica:

1° **In serie o tensione**: la stessa corrente attraversa, una dopo l'altra, le varie lampadine inserite nel circuito; com'è indicato nella Fig. 553 e schematicamente nella Fig. 554, in cui *A* rappresenta il generatore della corrente e i cerchietti rappresentano le lampadine. La tensione necessaria per alimentare tutte

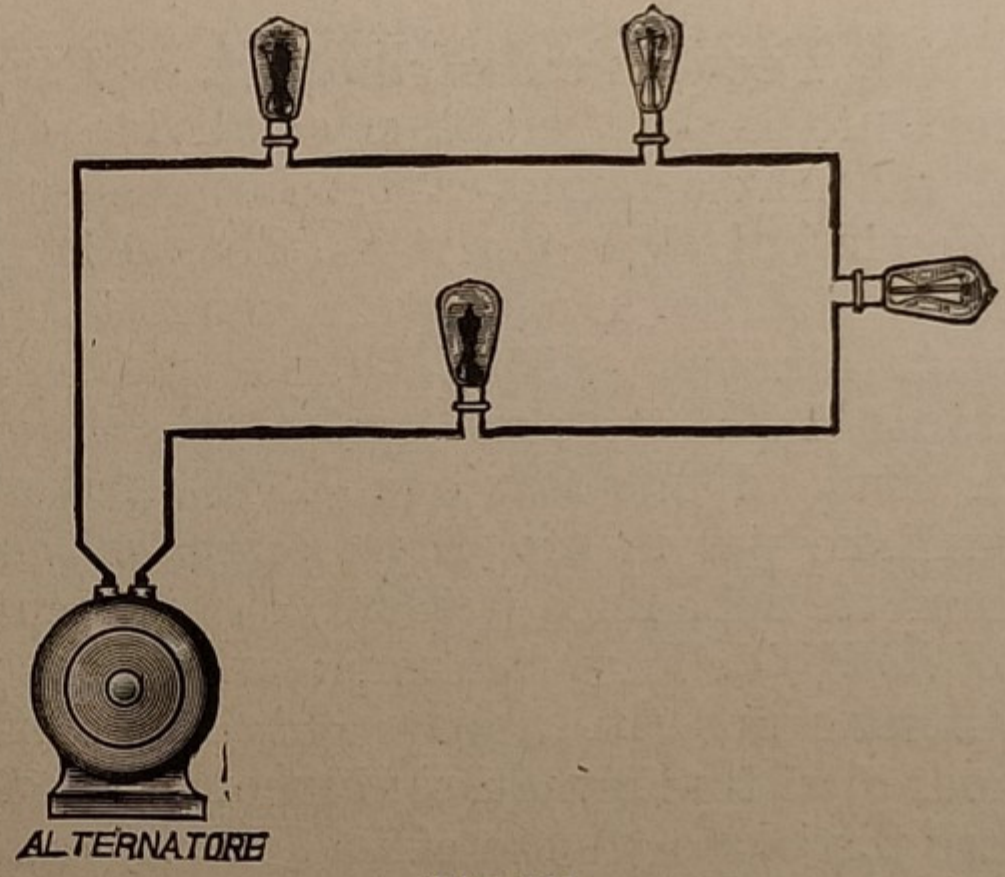


Fig. 553.

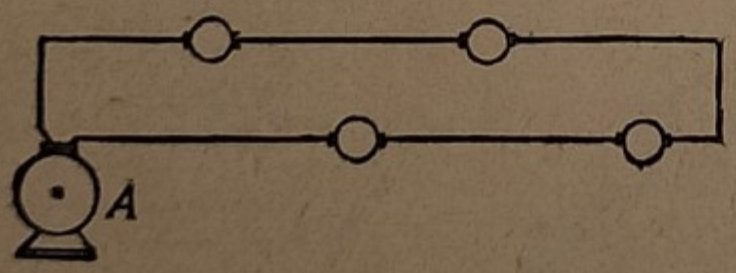


Fig. 554.

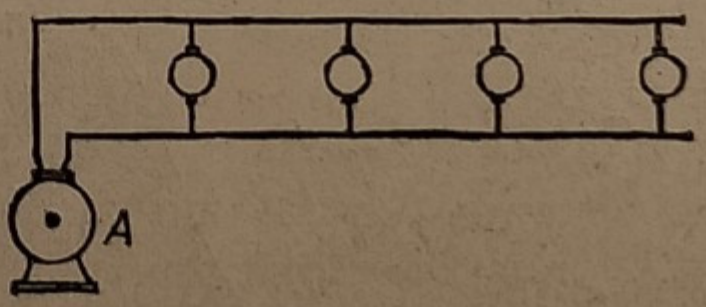


Fig. 555.

le lampadine, dev'essere la somma delle tensioni richieste dalle singole lampadine, e può essere diversa da una lampadina all'altra; mentre l'intensità della corrente necessaria per tutte le lampadine è uguale a quella occorrente per una sola, e dev'essere eguale per tutte le lampadine. Questo sistema offre il vantaggio di potere adoperare corrente a più alto voltaggio, e perciò conduttori più sottili a pari energia distribuita; ma ha parecchi inconvenienti. Tra questi il principale è che se si rompe o si spegne una lampada, ivi s'interrompe la corrente e si spengono contemporaneamente

tutte le altre lampadine della serie. Si sono immaginati interruttori e portalampade speciali, tali che lo spegnersi di una lampada inserisce automaticamente una comunicazione che assicura egualmente il passaggio della corrente e il circuito non si interrompe; ma oltre la complicazione dell'impianto, avviene che ogni esclusione di una lampada altera la distribuzione delle tensioni sulle altre del circuito. Il sistema si adopera perciò solo per illuminazione delle vie, ove le lampadine devono rimanere accese sempre in egual numero per la durata dell'illuminazione.

2° **In parallelo o derivazione.** Le lampadine sono distribuite in tanti *rami derivati* tra i due fili che portano la corrente elettrica, come mostra lo schema della Fig. 555. Questo sistema assicura l'indipendenza delle varie lampadine, ed è quello comunemente adoperato. La tensione richiesta per tutte le lampadine, è quella occorrente per una sola; mentre l'intensità totale della corrente dev'essere la somma delle intensità richieste dalle singole lampadine e può essere diversa da una lampadina all'altra.

355. **Feeders e distributori.** — Per una più regolare distribuzione della corrente in una città, si suddivide questa in un certo numero di *zone*, al cui centro fanno capo i fili, che portano la corrente dalla *centrale elettrica* in cui viene generata. Spesso la corrente arriva alla centrale da lontano, cioè dal luogo ove è generata usufruendo della potenza di una cascata d'acqua (§ 353). Questa può essere a parecchie decine di km. distante dalla città; nel qual caso si impiega la *corrente alternata*, che arriva in città ad *alta tensione* (§ 351). Arrivata alla centrale, se ne abbassa la tensione per mezzo di *trasformatori* sino a qualche migliaio di volt, e si immette nelle linee (*feeders*) che alimentano i centri (o *nodi*) delle varie zone; su questi *feeders* non vengono inseriti apparecchi di utilizzazione. Ai nodi altri trasformatori riducono la tensione al valore più basso di esercizio dell'impianto; dai nodi la corrente viene distribuita per mezzo di altre condutture, dette i *distributori*. Per impianti misti

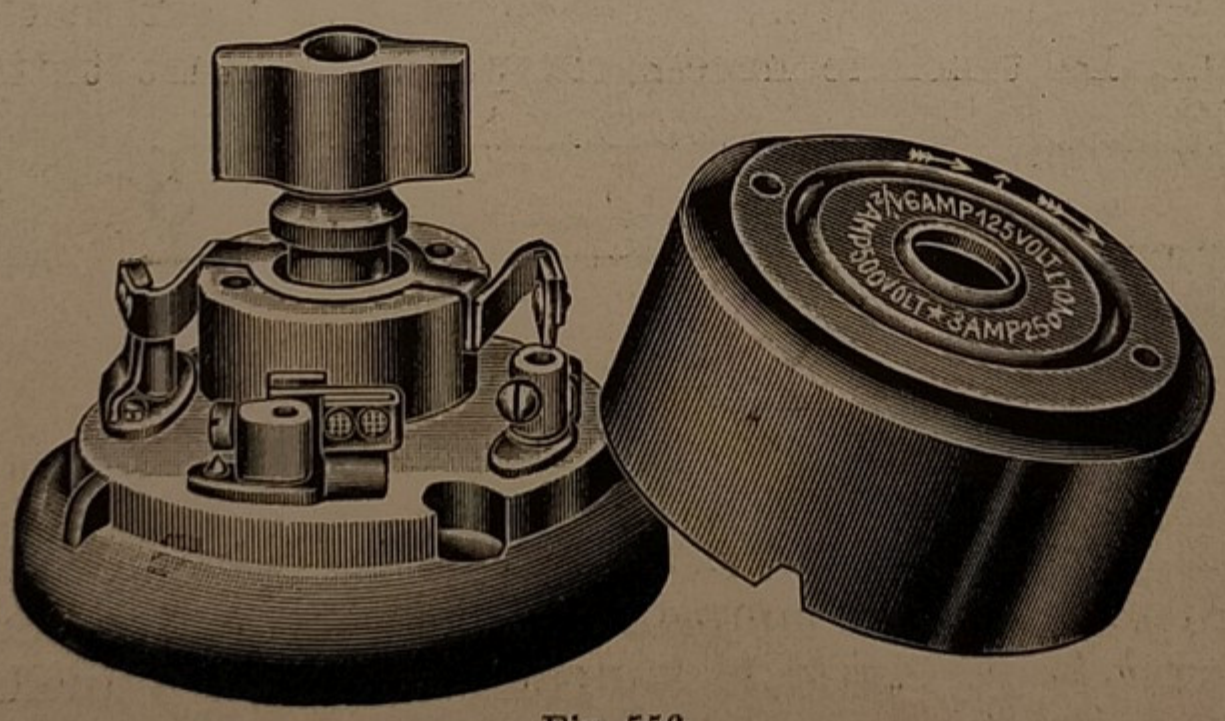


Fig. 556.

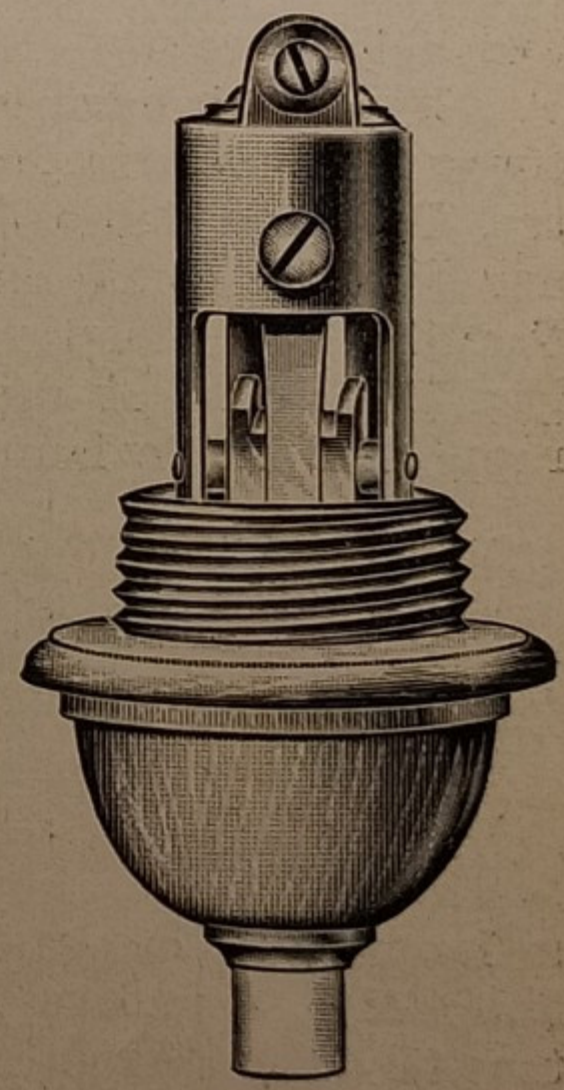


Fig. 557.

per illuminazione e forza motrice, con corrente alternata, abbiamo accennato al § 343 come si può ottenere una distribuzione con tensione maggiore per i motori e minore per le lampadine.

Dai fili dei distributori vengono derivate le *prese* che fanno capo al *contatore*, il quale misura l'energia elettrica consumata; subito dopo il contatore, nel *quadro* in cui esso è collocato, si pongono le *valvole* (§ 287), dalle quali la corrente passa nelle condutture interne, che la distribuiscono nei vari locali in cui sono disposte le lampadine. Ad ogni lampadina o gruppo di lampadine, è inserito un *interruttore*, che serve a far passare o interrompere la corrente quando si vuole; cioè ad accendere o spegnere la lampada al momento voluto. Le Figg. 556-557 mostrano due interruttori tra i più adoperati.

Problemi da risolvere.

1. In un paese arriva corrente monofase a 3000 *V*, e si devono alimentare alla tensione di 120 *V*:

150 lamp. ½ w. da 100 *cand.*
200 » monow. » 50 »
20 » filo carbone » 16 »
5 motori da 2 *HP* cad. (rendim. 85%, $\cos\varphi = 0{,}80$).

Calcolare: l'intensità della corrente primaria e secondaria del trasformatore occorrente, e il numero delle spire del secondario se quelle del primario sono 3500.

2. Qual'è il rendimento di un trasformatore monofase, che ha al primario 3420 spire ed al secondario 130, se riceve corrente a 3500 *V* e dà al secondario corrente a 125 *V*?

3. Una linea comprende 60 lamp. $^1/_2$ *w*. eguali, da 200 cand. ciascuna, riunite in serie. Calcolare la tensione ai capi della linea, se ciascuna lampada richiede 50 V, ed il rendimento della linea è del 96 $^0/_0$.

4. Tra due conduttori sono inseriti in parallelo 75 lamp. $^1/_2$ *w*, di cui 25 da 100 cand., 25 da 150 cand., e 25 da 200; la tensione d'esercizio è di 125 *V*, il rendimento della linea del 95 $^0/_0$. Calcolare l'intensità totale della corrente e la tensione ai capi della linea.

Le oscillazioni elettriche.

356. **Scarica oscillatoria.** — Si abbiano due vasi *A*-*B* contenenti un liquido a diverso livello, e comunicanti per mezzo di un tubo *T*, munito di un rubinetto *R*, (Fig. 558). Se il tubo *T* è stretto e lungo, cioè *offre molta resistenza* al movimento del liquido, allorchè si apre *R* il liquido scende lentamente da *A* verso *B*, ed appena ha raggiunto nei due vasi lo stesso livello si ferma.

Se invece il tubo è grosso e corto, cioè *offre poca resistenza* al movimento del liquido, questo si precipita rapidamente da *A* verso *B*, e *per l'inerzia*, allorchè è arrivato nei due vasi allo stesso livello, non si ferma; ma si porta in *B* alquanto più in alto che in *A*; allora ridiscende verso *A*, e così via, finchè dopo alquante oscillazioni di ampiezza decrescente si ferma allo stesso livello.

Dunque il liquido si muove da *A* verso *B* **sempre nello stesso senso** quando incontra molta resistenza nel tubo di comunicazione; passa invece con **moto oscillatorio** quando incontra poca resistenza. Ma si deve osservare che un tubo grosso rispetto a due vasi di piccole dimensioni, diventa stretto se i due vasi sono due grandi vasche; inoltre, negli stessi vasi e con lo stesso tubo, un liquido leggero e vischioso potrà passare con moto

continuo, mentre un altro liquido più pesante, cioè con molta inerzia per la quale conservi più a lungo il moto acquistato, potrà invece passare con moto oscillatorio. Il passaggio è dunque oscillatorio allorchè il tubo di comunicazione offre *una resistenza piccola in relazione con la capacità dei vasi e con l'inerzia del liquido.*

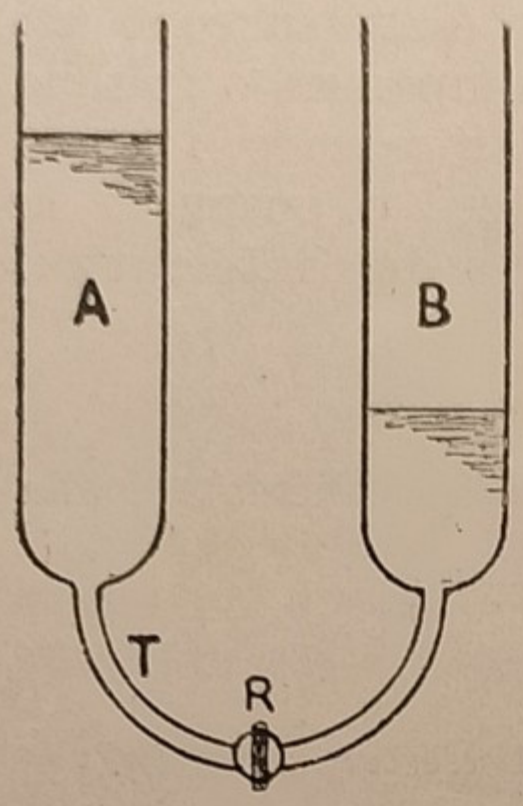


Fig. 558.

Analogamente, invece di vasi contenenti liquido si abbiano due conduttori carichi di elettricità a diverso potenziale; se l'elettricità passa dall'uno all'altro sotto forma di scarica, questa sarà **continua** cioè in un senso solo, se la resistenza del mezzo in cui si produce è grande; sarà **oscillatoria**, cioè alternativamente nei due sensi, se la resistenza è piccola. Nel secondo caso cioè, quella che all'occhio appare una sola scintilla, della durata di qualche millesimo di secondo, è in realtà l'insieme di più scintille, che si succedono una dopo l'altra alternativamente nei due sensi, con l'intervallo di qualche bilionesimo di secondo l'una dall'altra.

Ma anche ora *la resistenza deve essere piccola in relazione con la capacità dei conduttori e con l'autoinduzione*, la quale (come vedemmo al § 324) per l'elettricità esprime ciò che è l'inerzia per i liquidi.

Col calcolo si trova che la scarica è oscillatoria allorquando:

$$1) \qquad R < \sqrt{\frac{4\,L}{C}}$$

in cui R è la *resistenza elettrica*, L l'*induttanza*, C la *capacità*.

In generale sono oscillatorie le scariche dei condensatori, se di piccola lunghezza. La prova sperimentale fu ottenuta la prima volta da Feddersen, esaminando la scintilla per mezzo di uno specchio girante a grandissima velocità; l'immagine della scintilla così ottenuta, invece di una striscia luminosa continua, quale si avrebbe con una scarica continua, era invece una striscia a tratti alternativamente luminosi ed oscuri.

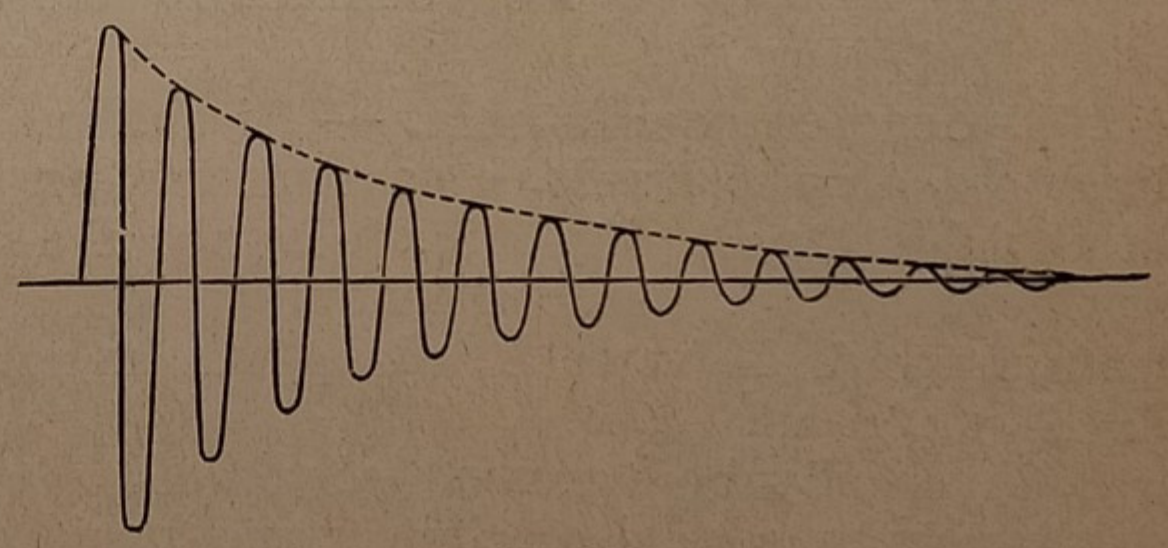


Fig. 559.

La Fig. 559 rappresenta graficamente la variazione di intensità della corrente in una scarica oscillatoria, rapidamente smorzantesi.

Il *periodo* T (cioè la durata) di ogni oscillazione, secondo una formula approssimata del Thomson, è:

$$2) \qquad T = 2\,\pi\sqrt{L\,C}\;;$$

nella quale T è espresso in *secondi*, L in *henry* e C in *farad*.

357. **Onde elettromagnetiche.** — La scarica oscillatoria adunque produce attorno a sè, nello spazio, un campo elettrico variabile; e poichè come sappiamo (§ 293), ogni azione elettrica è accompagnata da un campo magnetico, si produce contemporaneamente a quello elettrico un campo magnetico, anch'esso variabile con la stessa frequenza del primo; le direzioni di questi campi sono tra loro perpendicolari. Le superfici equipotenziali di questi due campi, continuamente variabili di posizione con la frequenza delle oscillazioni della scarica, generano un sistema di onde concentriche, dette appunto **onde elettromagnetiche**, di cui la scarica oscillatoria è il centro; esse si propagano nello spazio con la stessa velocità di quelle luminose, (300 000 km al s.).

Problema. — *Quante volte in un secondo l'onda elettrica farebbe il giro della Terra?*

Soluzione. — Ricordiamo che (dalla definizione di metro) la circonferenza terrestre è: $s = m.40\,000\,000 = km.40\,000$. La velocità delle radioonde, è uguale a quella della luce, cioè: $V = {}^{km}/_{s}$ 300 000. Quindi in un secondo l'onda elettrica percorrerebbe $km.40\,000$, volte:

$$n = \frac{V}{s} = \frac{300\,000}{40\,000} = \mathbf{7{,}5} \text{ volte.}$$

Problema. — *Se l'induttanza di un circuito è di 0,0015 henry, calcolare la capacità di esso perchè risuoni per una lunghezza d'onda di m.7,50.*

Soluzione. — La formula di Thomson 2): $T = 2\pi\sqrt{L\,C}$, lega il *periodo* T con l'induttanza e la capacità del circuito. Ricordando la formula che lega il periodo alla velocità V di propagazione delle onde ed alla lunghezza d'onda λ (§ 92; $T = {}^{1}/_{n}$), si ha:

$\lambda = V\,T$; e sostituendo a T il valore precedente:

$\lambda = 2\pi\,V\sqrt{LC}$. Adottando le unità pratiche (d'induttanza l'*henry* (h), di capacità il *farad* (f)), avremo:

$$\lambda\,(metri) = 2\pi\,V\,({}^{m}/_{s})\sqrt{L\,(h)\times C\,(f)} \qquad \text{cioè:}$$

$$\lambda\,(metri) = 2\times 3{,}1416\times 300\,000\,000\,({}^{m}/_{s})\sqrt{L\,(h)\times C\,(f)}\ ;$$

o anche, esprimendo L in *microhenry* ($1\mu h = h\times 10^{-6}$) e C in *microfarad* ($1\mu f = f\times 10^{-6}$):

$$\lambda\,(m) = 1\,884\,960\,000\sqrt{L\,(\mu h)\times 10^{-6}\times C\,(\mu f)\times 10^{-6}}$$

$$= 1\,884\,960\,000\times 10^{-6}\sqrt{L\,(\mu h)\times C\,(\mu f)} \qquad \text{o approssimativamente:}$$

$$\lambda\,(m) = 1\,885\sqrt{L\,(\mu h)\times C\,(\mu f)}\ .$$

Coi dati del problema: $\lambda = 750$ m; $L = 1500\,(\mu h)$, si ha:

$$750 = 1885\sqrt{1500\times C\,(\mu f)}\ ; \qquad \text{da cui;}$$

$$C\,(\mu f) = \frac{750^2}{1885^2\times 1500} = \mathbf{0{,}0001}\ \mu f \text{ circa.}$$

358. **Esperienze di Hertz.** — Fu Hertz [1] che per il primo nel 1889 studiò sperimentalmente le proprietà delle onde elettromagnetiche. Egli costruì un apparecchio, chiamato **oscillatore,** capace di emetterle. Esso è formato da due sfere A ed A' di metallo, comunicanti con due altre sfere a ed a' più piccole, a qualche millimetro di distanza tra loro, (Fig. 560); queste sono collegate coi due poli di un rocchetto di Ruhmkorff B. Se questo è in funzione, in C scoccano delle scariche, che sono oscillatorie; formando A ed A' le armature di un condensatore, separate dall'aria che fa da coibente.

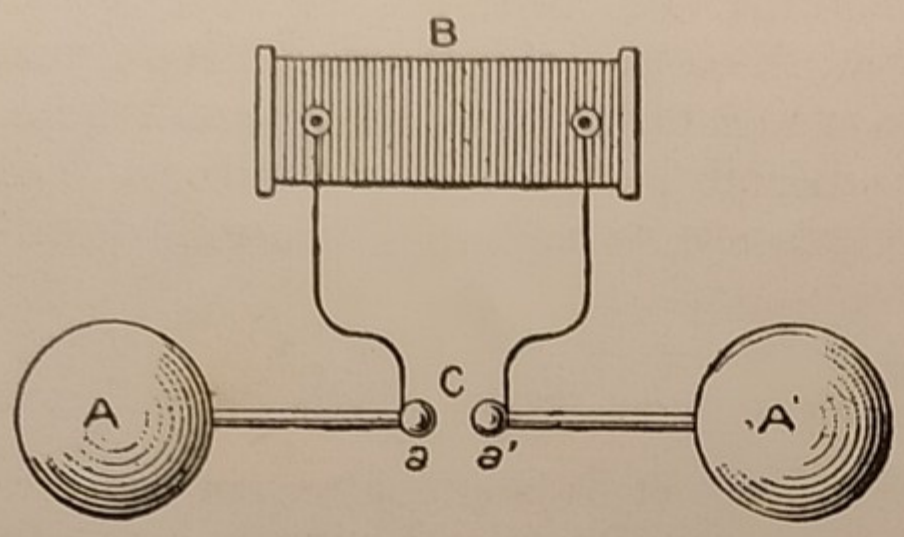


Fig. 560.

Non potremmo accorgerci dell'esistenza delle onde elettromagnetiche, che non agiscono sui nostri sensi, se non avessimo qualcosa che le rivelasse. Hertz costruì un **risonatore,** costituito da un anello di metallo M, con una piccola interruzione in un punto, (Fig. 561). Se esso è posto nella posizione 1, una stessa onda investe le due metà di destra e di sinistra in tempi successivi; mentre nello stesso istante tali due metà possono essere investite da onde in fase opposta di vibrazione; cioè fra queste metà può stabilirsi una differenza di potenziale, e nell'interruzione M si osservano piccole scintille. Perchè ciò avvenga occorre che il diametro del risonatore sia, ad es., eguale alla mezza lunghezza d'onda; onde un risonatore che funzioni con un dato oscillatore, potrà non funzionare con un altro, che emetta onde di lunghezza diversa.

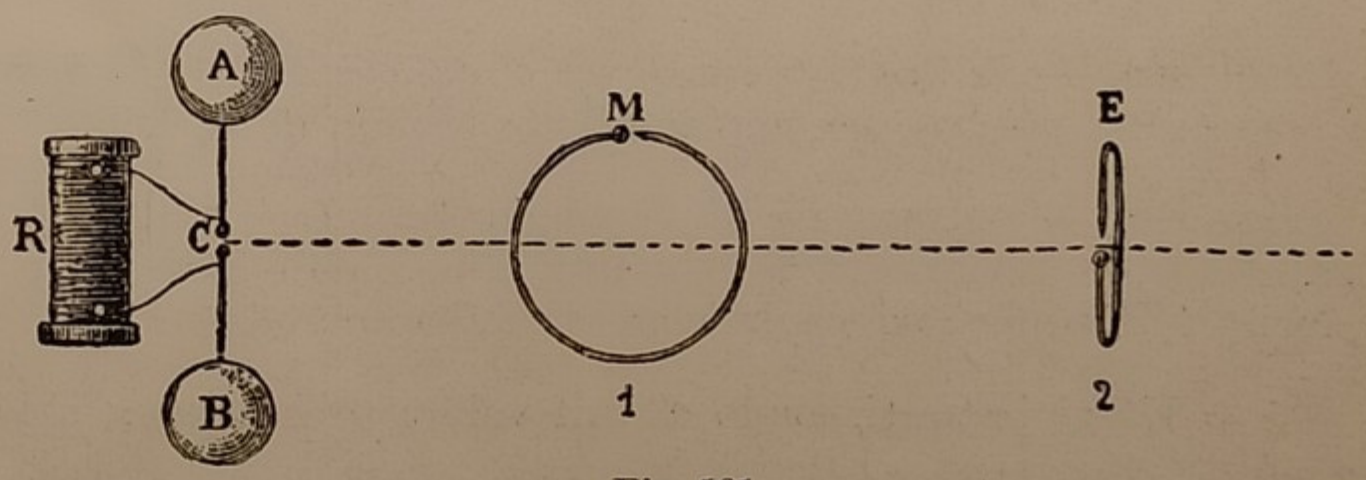


Fig. 561.

Se il risonatore è posto nella posizione 2, tutti i suoi punti sono investiti contemporaneamente dalla stessa onda, e non si stabilisce differenza di potenziale; quindi le scintilline all'interruzione non si formano.

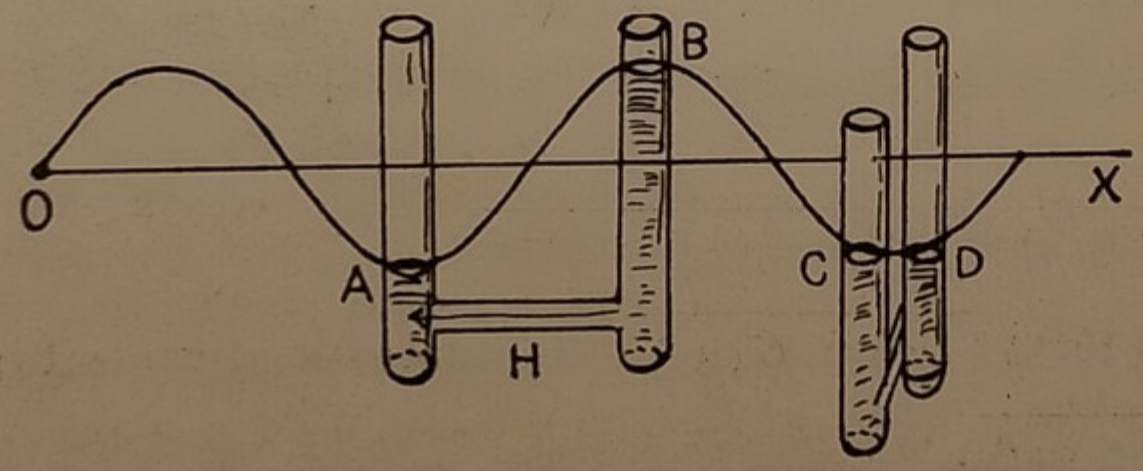


Fig. 562.

Per comprendere meglio questo fatto, riferiamoci alla solita analogia idraulica: da un punto O alla superficie dell'acqua partono onde circolari;

---

(1) Hertz Heinrich, fisico tedesco; n. ad Amburgo nel 1857, m. a Bonn nel 1894.

rappresentiamo con la linea ondulata $OABD$ la sezione della superficie dell'acqua con un piano verticale passante per O, (Fig.562).

Collochiamo in AB (cioè in un piano verticale contenente il raggio OX) due recipienti fra loro comunicanti, alla distanza di mezza lunghezza d'onda; allorchè in A vi è la mezza onda incavata, in B vi è la mezza onda rilevata, e viceversa; in A e B vi è acqua a diverso livello e perciò nel tubo di comunicazione H vi è un passaggio d'acqua alternativamente nei due sensi; ciò corrisponde alla posizione 1 del risonatore d'Hertz, il cui ufficio qui è assunto dal sistema AHB. Se invece collochiamo i due recipienti nella posizione CD (in un piano perpendicolare ad OX) in essi al passaggio dell'onda l'acqua sale e scende contemporaneamente; e non formandosi differenza di livello non vi è movimento di liquido dall'uno all'altro; ciò corrisponde alla posizione 2 del risonatore d'Hertz.

Coi mezzi sopra indicati Hertz studiò il comportamento delle onde elettromagnetiche, e dimostrò che esse hanno tutte le proprietà delle onde luminose: attraversano i corpi isolanti che sono come trasparenti, e furono perciò chiamati **dielettrici**; i corpi conduttori invece sono opachi, anche sotto spessore piccolissimo. Esse *si riflettono*, *si rifrangono*, *interferiscono*, ecc., come fanno quelle luminose. Si ha così completa identità nella causa che produce la luce, il calore, e questa forma di elettricità; non essendovi fra queste varie energie altra differenza che nel numero delle vibrazioni al secondo; come appunto accennammo al § 116.

359. **Teoria elettromagnetica della luce.** — Con le esperienze di Hertz si ha una brillantissima conferma della **teoria elettromagnetica della luce.** Il fisico inglese Maxwell [1] ha dimostrato che le onde elettromagnetiche si propagano (nel vuoto) con velocità eguale al rapporto tra l'unità elettromagnetica e quella elettrostatica di intensità di corrente (§ 297). Per questo fatto egli suppose che anche la *luce fosse un fenomeno elettromagnetico*; cioè, in un punto dello spazio, investito da un'onda luminosa, anzichè supporre una particella d'etere in rapida vibrazione, il Maxwell immaginò che esista un campo elettromagnetico variabile rapidissimamente, con la frequenza eguale a quella della luce.

Abbiamo supposto (§ 231) che un elettrone, ruotando nella sua orbita può per cause esterne allontanarsi e ritornare nella sua orbita; questa variazione di posizione avviene con moto alternativo rapidissimo, cioè con moto vibratorio di alta frequenza; l'elettrone così diventa il centro di emissione di un sistema di onde elettromagnetiche, che si propagano nello spazio con la velocità della luce e con la stessa frequenza della vibrazione dell'elettrone.

La specie di radiazione emessa dall'elettrone, dipende dalla frequenza del suo moto vibratorio, ossia dalla lunghezza d'onda del sistema di onde generate; come abbiamo già visto in *Ottica*, al § 116. Cioè ripetendo: Onde, la cui lunghezza varia da qualche km. sino a 0,1 mm, costituiscono le oscillazioni elettriche, che studiamo in questo capitolo; da 0,3 mm. a

---

(1) Maxwell James Clerck, grande scienziato dell'Univ. di Cambridge; n. a Edimburgh nel 1831, m. a Cambridge nel 1879.

0,8 *micron*, costituiscono i *raggi infrarossi*; da 0,8 μ a 0,4 μ si hanno le *radiazioni luminose* visibili; da 0,4 μ a 100 *angström* [1] si hanno i *raggi ultravioletti*; da 100 a 0,1 A, i *raggi X*; da 0,1 a 0,005 A, i *raggi* γ; oltre questo limite (circa 0,0001 A), i *raggi ultrapenetranti* di Millikan (§ 232).

Questa teoria elettromagnetica della luce, oramai universalmente accettata, ha anche il pregio di non richiedere l'ipotesi dell'esistenza dell'etere cosmico, per spiegare come si propaghi l'energia raggiante; poichè le vibrazioni elettromagnetiche sono rapide perturbazioni del campo elettromagnetico, che si effettuano nel vuoto, senza bisogno di supporre l'esistenza di un mezzo elastico.

360. **Oscillatore e risonatore del Righi.** — Il Righi [2] perfezionò gli apparecchi d'Hertz. Costruì l'oscillatore come è indicato in Fig. 563. La scarica avviene tra due sfere di metallo $S\,S$ affacciate a qualche millimetro di distanza, dentro una scatola isolante C, contenente olio di vaselina. Due palline più piccole A ed A' sono messe in comunicazione coi due poli del rocchetto. Così scoccano tre scintille: due in A ed A' nell'aria; una centrale tra le sfere grandi, quindi nell'olio di vaselina. Le prime due non sono oscillatorie e servono solo a stabilire una differenza di potenziale costante, per ciascuna scarica centrale; questa è invece oscillatoria.

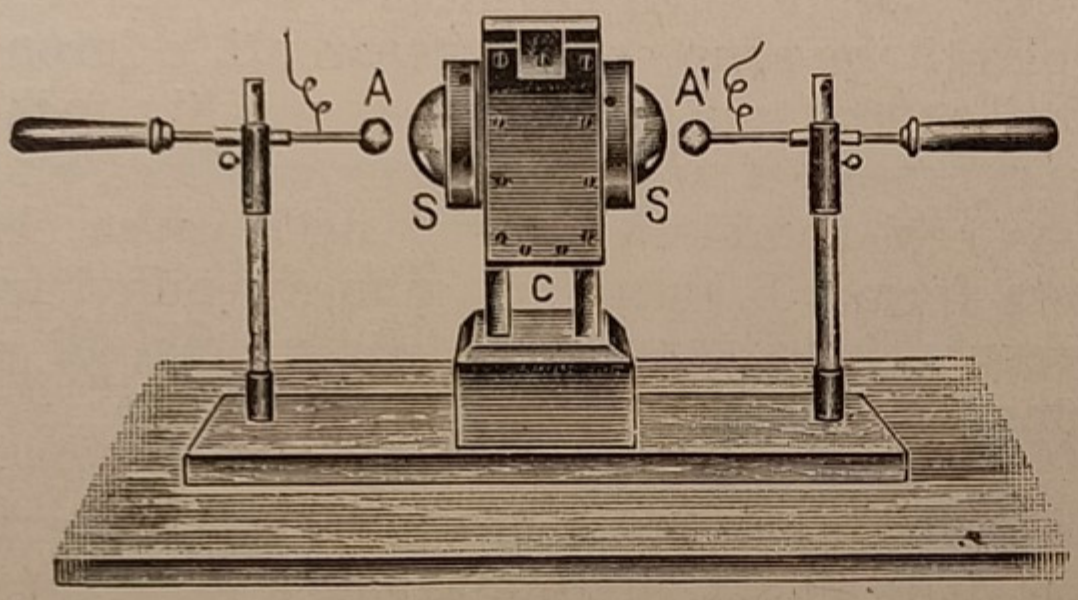


Fig. 563.

In tal modo la scarica oscillatoria avviene non nell'aria ma in un liquido isolante; in guisa che a pari distanza esplosiva occorre maggiore energia per prodursi, ed aumenta perciò l'effetto ottenuto con essa.

Rese assai più sensibile il risonatore, facendolo con una striscia di vetro argentata, ricavata da un pezzo di specchio, su cui raschiava l'argentatura in modo da lasciarne una striscia lunga qualche centimetro e larga pochi mm, che divideva in due parti eguali con una sottilissima scalfittura fatta con la punta di un ago. È in questa finissima interruzione che si osservano le scintilline dovute all'azione delle onde; le due metà della striscia d'argento corrispondono ai due mezzi anelli del risonatore d'Hertz.

Con tali apparecchi si è riusciti a produrre onde elettromagnetiche, di lunghezza variabile da qualche chilometro a qualche millimetro; il numero delle vibrazioni corrispondenti varia da qualche centinaio di migliaia a qualche centinaio di bilioni al minuto secondo (§ 116).

---

(1) 1 A = 1 decimilionesimo di mm; vedasi nota del § 232.

(2) Righi Augusto, fisico dell'Univ. di Bologna; n. a Bologna nel 1850, m. ivi nel 1920.

361. **Coherer.** — Un mezzo di assai maggiore sensibilità per rivelare le onde elettromagnetiche, è il **coherer** proposto dal Branly [1] nel 1890.

Esso è formato da un tubetto di vetro T (Fig. 564), di qualche millimetro di diametro, in cui sono affacciati due cilindretti di metallo E ed E' non in contatto; fra di essi è posta un poco di limatura metallica l. Si forma un circuito che comprende tale *coherer*, una pila P (di 2 o 3 *volt*) ed un galvanometro G; questo non segna corrente. Ciò perchè, sebbene il circuito sia apparentemente chiuso, in realtà la limatura l offre tanta resistenza alla corrente, da essere pressochè isolante.

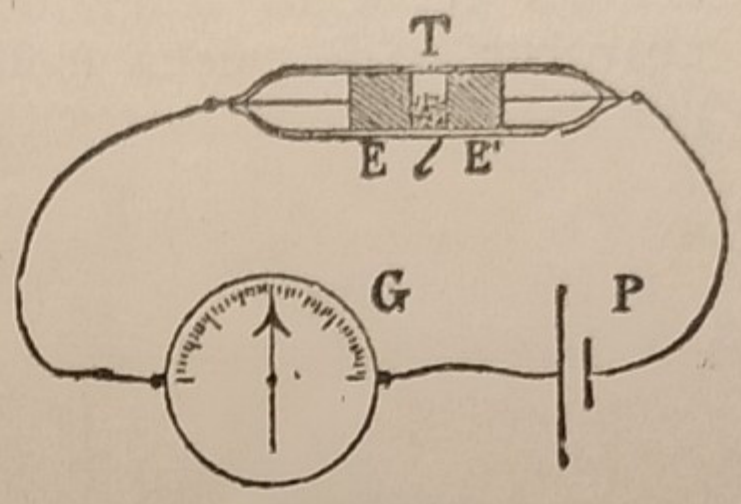


Fig. 564.

Ma se il *coherer* è posto sotto l'influenza delle onde elettromagnetiche, la limatura diviene conduttrice, ed il galvanometro accusa una notevole corrente [2]. Il *coherer* rimane conduttore, finchè una leggera scossa data al tubetto, smuovendo la limatura, non la rende nuovamente isolante ed atta perciò a rivelare nuove onde.

Non è ancora del tutto nota la spiegazione di tale fenomeno. Lodge lo attribuì ad una maggiore aderenza che si forma tra i successivi granelli di limatura, in leggero contatto tra loro, per azione delle onde; da cui il nome di *coherer*. Ma non si sa dire come avvenga e perchè tale maggiore aderenza.

Radiotrasmissioni.

362. **Telegrafia senza fili.** — È con un oscillatore Righi quale trasmettitore e con un *coherer* quale ricevitore, che Marconi [3] riuscì a trasmettere nel 1896 segnali a distanza, con le onde elettromagnetiche e quindi **senza fili.** Ma negli ultimi anni gli apparecchi di **radiotelegrafia** [4] sono stati assai cambiati dai primi adoperati dal Marconi.

Una stazione trasmettitrice semplice, rappresentata in modo assai schematico in Fig. 565, comprende un trasformatore T, alimentato da corrente alternata; le scariche oscillatorie si producono tra le sfere S di un **eccitatore,** di cui una è posta in comunicazione con la terra, l'altra con l'**antenna o aereo.** Questa è costituita da un fascio di fili conduttori, isolati e sostenuti a grande altezza da pali opportuni (Fig. 566), o tra gli alberi di un bastimento, (Fig. 567).

Una stazione ricevente semplice, per piccole distanze, è costituita da un'antenna (simile a quella trasmittente, ma assai più piccola), che comunica con la terra attraverso il primario R di un trasformatore, (Fig. 568);

---

(1) Branly Eduard; n. a Amiens nel 1844.

(2) La proprietà delle limature metalliche fu conosciuta fin dal 1838 da Munk e meglio studiata nel 1884 dal nostro Calzecchi-Onesti; ma il Branly l'applicò per il primo per la rivelazione delle onde elettromagnetiche.

(3) Marconi Guglielmo, vivente, presidente dell'Accademia d'Italia; n. a Bologna nel 1874.

(4) Si adoperano talvolta anche le iniziali *T. S. F.* che vuol dire *telegrafia senza fili.*

il secondario *S* di questo fa parte di un circuito, che comprende il **detector** *D* ed un ricevitore telefonico *T*. Il *detector* è formato da una punta metallica *P*, che si appoggia leggermente su un cristallo di **galena** (solfuro di piombo). Il contatto tra la punta

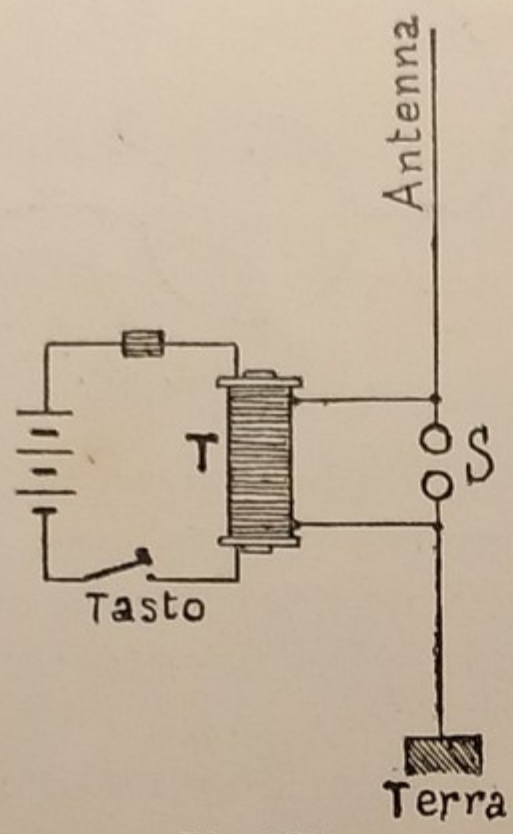


Fig. 565.

ed il cristallo, sostituisce la limatura del *coherer*, cioè trasmette corrente sotto l'azione delle onde; ma ha il vantaggio di non richiedere la scossa per ritornare isolante. Tale detector è rappresentato più in grande nella Fig. 569.

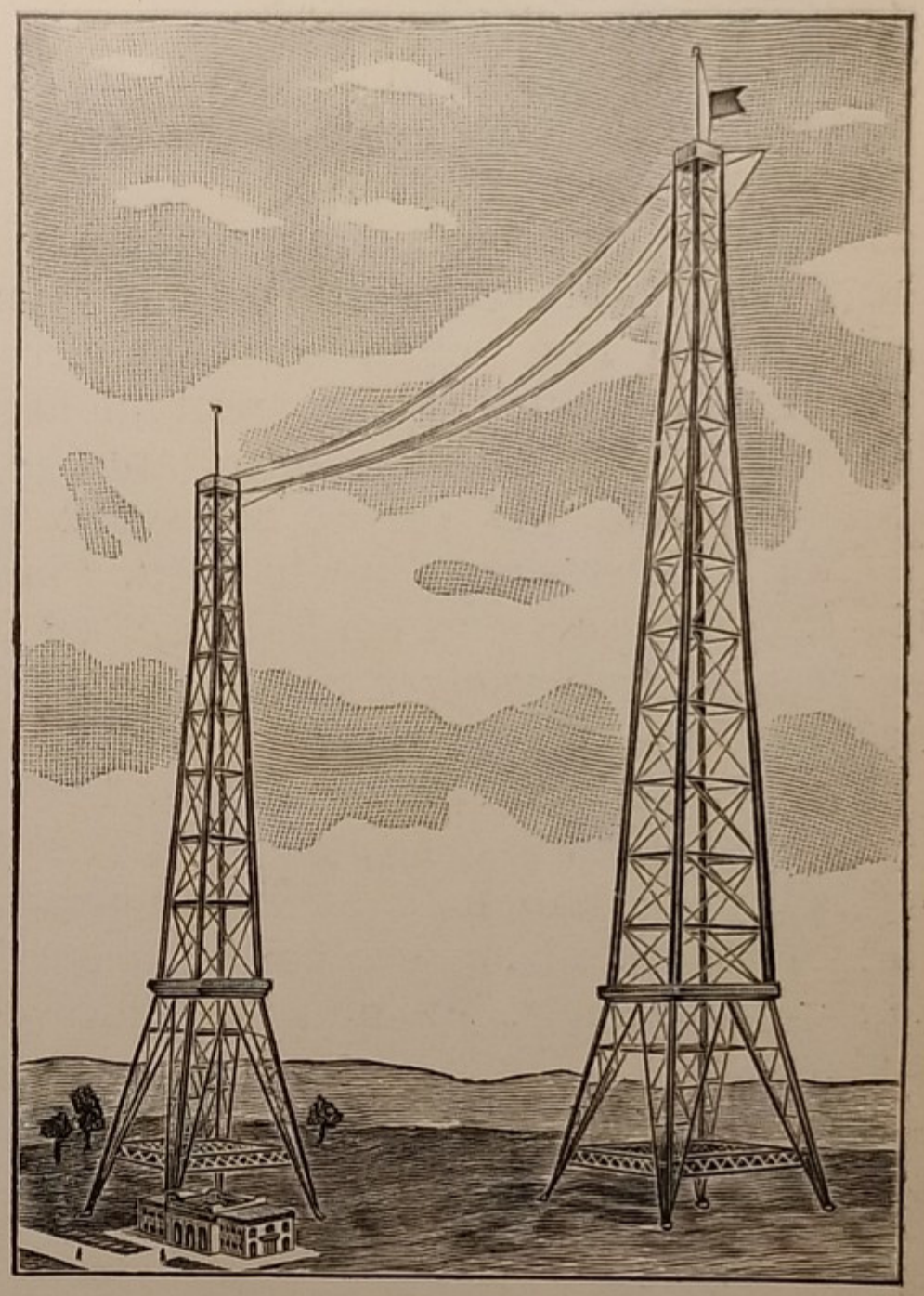


Fig. 566.

Fig. 567.

Per l'azione delle onde, il circuito *antenna-terra* è percorso da una corrente oscillatoria, di frequenza eguale a quella delle onde che investono

l'antenna. Per induzione si produce nel secondario S una corrente indotta di pari frequenza, pure alternata. Il *detector* ha la proprietà di far passare solo gli impulsi di corrente che sono diretti dalla punta verso il cristallo (purchè la f.e.m. della corrente sia piccola); quindi lascia passare al ricevitore T una corrente non più alternata ma continua, sebbene pulsante. In tal modo ad ogni scintilla del trasmettitore, si ha un piccolo colpo al telefono T; accostando questo all'orecchio, si ode un rumore, che è la debole riproduzione di quello delle scintille all'eccitatore della stazione trasmettente. Tale rumore per tempo breve o per tempo più lungo, corrisponde ai *punti* e *linee* dell'alfabeto Morse.

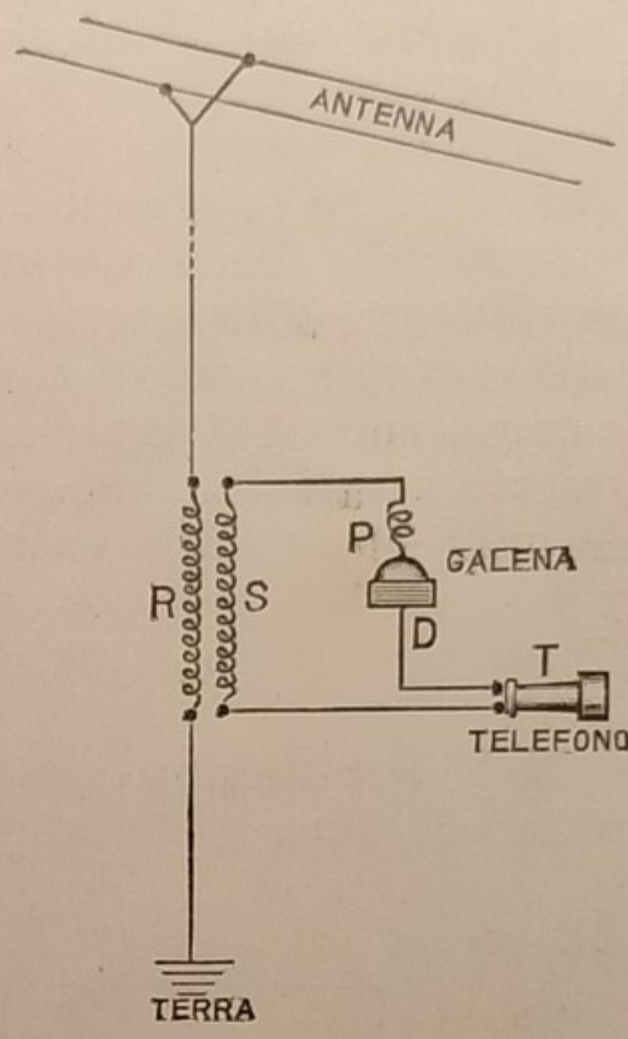


Fig. 568.

Senza il detector non si potrebbe udire il suono al telefono; perchè arrivando a questo la corrente alternata ad altissima frequenza trasmessa dall'antenna, la lamina del telefono, per la sua inerzia, non potrebbe vibrare con tale frequenza di bilioni di periodo al secondo; e quand'anche vibrasse non si udrebbe un suono, poichè sappiamo che il limite dei suoni percettibili è di 40000 vibrazioni al secondo (Vol.1° - § 354). Mentre col detector la lamina compie tante vibrazioni, quant'è il numero delle scintille del trasmettitore ad ogni secondo.

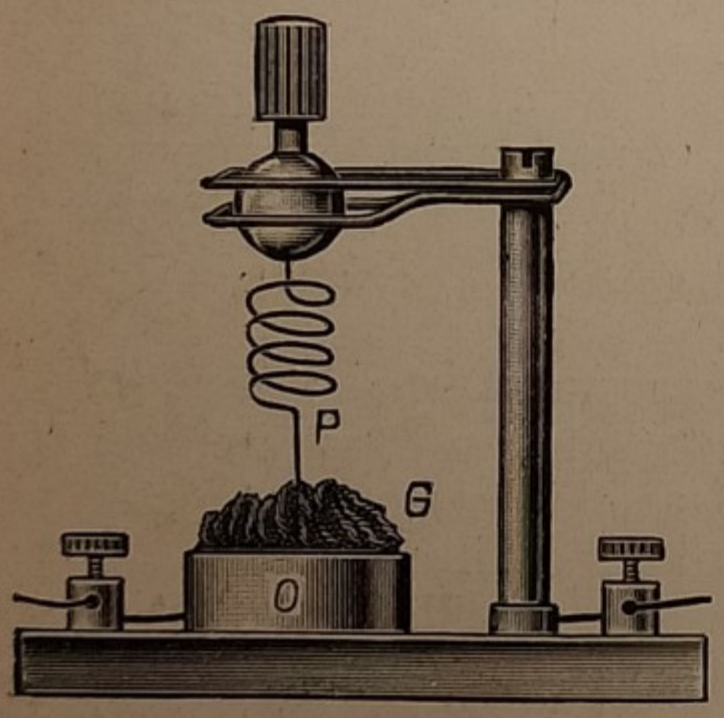


Fig. 569.

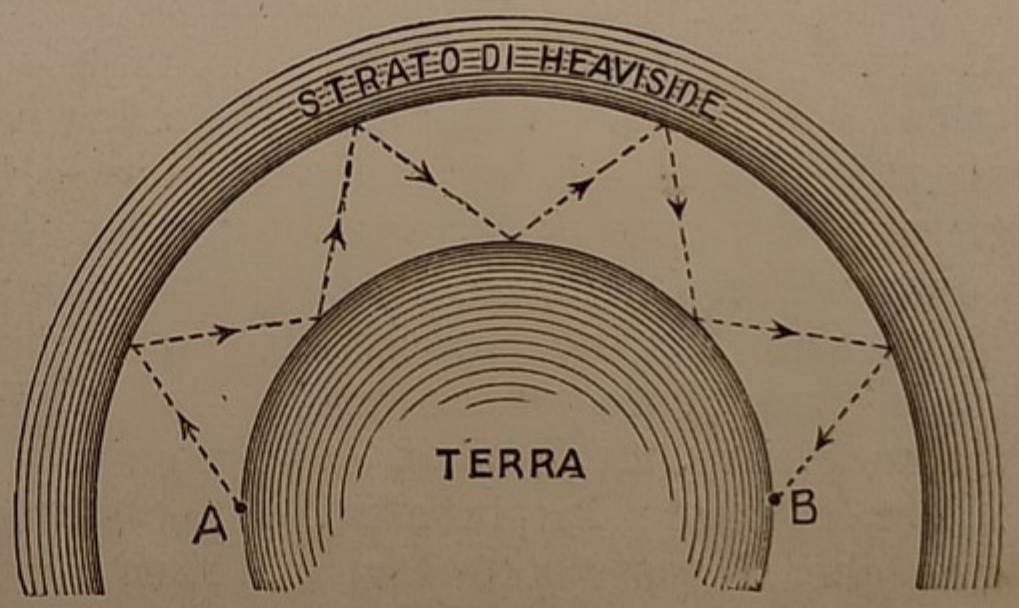


Fig. 570.

Sembrerebbe che un tale sistema di comunicazione non potesse servire per le grandi distanze, a causa della convessità della Terra; essendo questa conduttrice, è opaca per le onde elettriche (§ 358), che sarebbero quindi intercettate. Ma le radiazioni elettriche non si propagano in linea retta, come la luce. Dicemmo (§ 98) che la propagazione rettilinea della luce avviene, approssimativamente, perchè le onde luminose sono di lunghezza piccolissima rispetto alle dimensioni degli ostacoli; mentre il suono non si propaga in linea retta, perchè la lunghezza delle onde sonore è anche di qualche metro. A maggior ragione le onde elettriche potranno girare gli

ostacoli, come le montagne e la convessità della Terra, potendo esse avere lunghezza anche di qualche chilometro.

Ma la ragione principale per cui le onde elettriche possono perfino compiere più volte il giro della Terra, sta probabilmente nel fatto seguente. La Terra è circondata dall'atmosfera, che a partire da qualche decina di km. di altezza, è composta in prevalenza di idrogeno, elio ed atomi ionizzati, (Vol. 1° - § 341). Questo strato è perciò abbastanza conduttore; esso forma attorno alla Terra un involucro, chiamato lo **strato di Heaviside**; essendo conduttore è opaco per le radiazioni elettriche, che non possono perciò attraversare l'atmosfera; quindi appare per ora impossibile una comunicazione con gli altri pianeti, per mezzo delle onde elettromagnetiche. Inoltre questo strato funziona come un immenso specchio concavo; in modo che le onde elettriche possono girare attorno alla Terra, da un punto *A* a un punto *B*, per una successione di riflessioni tra lo *strato di Heaviside* e la Terra e viceversa, (Fig. 570, schematica, non in proporzione).

363. **Oscillazioni persistenti.** — Le scariche oscillatorie per la produzione di onde elettromagnetiche, furono le prime adoperate nelle radiotrasmissioni; ma oggi sono quasi del tutto abbandonate. Esse producono infatti solo impulsi staccati di oscillazioni elettriche; ogni scintilla è da paragonarsi ad un colpo di martello su una campana; e le scariche oscillatorie susseguentisi a breve intervallo una dopo l'altra, sono da paragonarsi ad una serie di rintocchi di una campana, o meglio al suono tremolante di un campanello elettrico. La Fig. 571 rappresenta graficamente un tale sistema di oscillazioni; in essa i tre gruppi di curve rappresentano tre scintille consecutive. Oscillazioni così fatte non si prestano alla **sintonia**, cioè all'accordo tra un apparecchio che le trasmette ed uno che le riceve: sintonia oramai necessaria pre poter scegliere e ricevere una data stazione trasmettente, tra le tante che funzionano contemporaneamente.

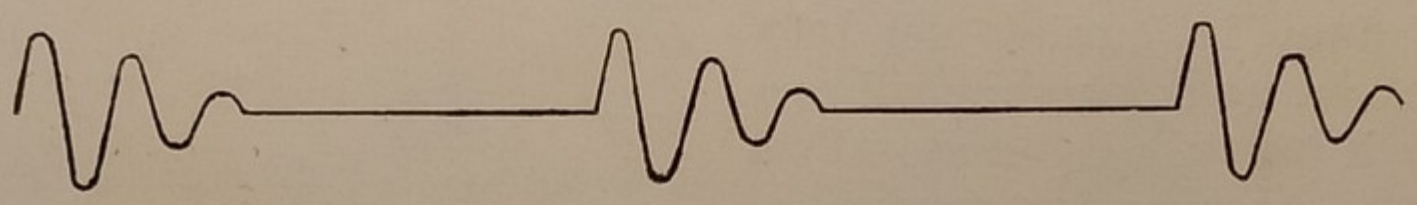


Fig. 571.

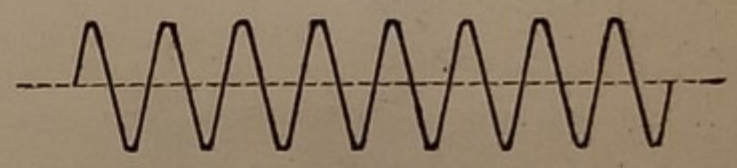


Fig. 572.

Per ottenere la sintonia, è necessario l'uso di **oscillazioni persistenti**, cioè che si susseguano senza interruzione e senza cambiamento d'intensità; da paragonarsi alle vibrazioni sonore di una canna d'organo, che suoni continuamente. La Fig. 572 rappresenta graficamente un sistema di tali oscillazioni. Queste oscillazioni persistenti si ottenevano qualche anno fa per mezzo di alternatori ad alta frequenza; ma oggi, specialmente per la **radiotelefonia**, si generano per mezzo dell'**audion**, necessario anche per la recezione delle onde.

364. **Audion.** — L'odierno meraviglioso progresso nel campo delle radiocomunicazioni è dovuto appunto ad un ingegnoso strumento, che va sotto i nomi diversi di: **audion** o **triodo**, o **valvola**, o talvolta semplicemente **lampada**.

Il principio su cui è fondato quest'apparecchio, è quello stesso di cui abbiamo fatto cenno nel § 211, parlando dei *tubi termoionici*. Cioè se un filamento metallico è portato all'incandescenza, dà luogo all'emissione di elettroni; che diviene più intensa, se vicino al filamento incandescente si pone un corpo elettrizzato positivamente.

Sia allora L (Fig. 573, schematica) una lampadina elettrica col vuoto molto spinto, il cui filamento F è portato all'incandescenza da una batteria A (pila o accumulatori) di circa 4-6 *volt*, detta **batteria di accensione.** P è un elettrodo elettrizzato positivamente; esso è una laminetta metallica, chiamata **la placca,** tenuta ad un potenziale positivo per comunicazione col polo positivo di un'altra batteria B, di circa 80-150 *volt*, chiamata la

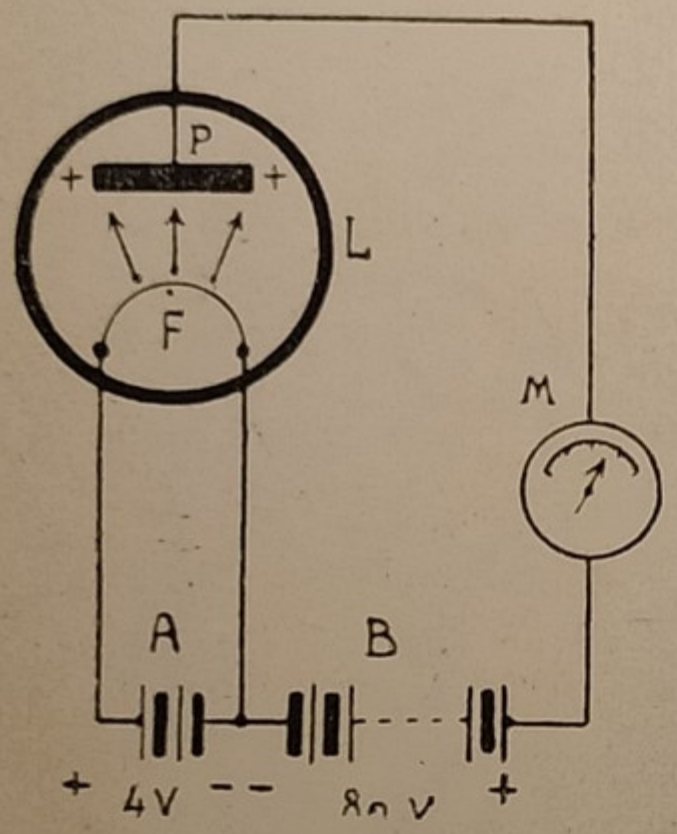


Fig. 573.

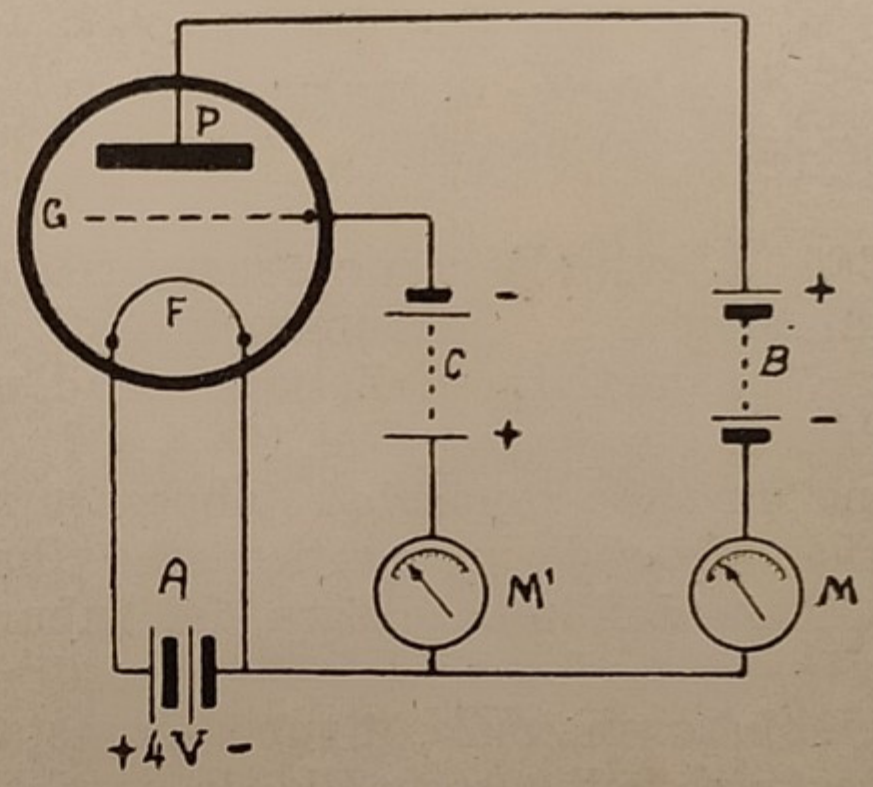


Fig. 574.

batteria anodica; il polo negativo di questa batteria è congiunto al polo negativo della batteria di accensione; nel circuito di B è inserito un milliamperometro M.

Acceso il filamento F, gli elettroni emessi da questo portano la loro carica su P e si stabilisce un passaggio di elettricità in M; questo passaggio sarebbe di brevissima durata per la saturazione della placca, se gli elettroni che colpiscono P, non venissero continuamente neutralizzati dalla carica positiva comunicata alla placca; ecco la necessità della batteria anodica. Si stabilisce allora una corrente elettrica persistente, che può raggiungere l'intensità di 10 milliampère, e che è accusata dal milliamperometro M. Avviene così che, mentre con la lampada spenta lo spazio tra F e P è un isolante quasi perfetto, appena acceso il filamento diventa un vero e proprio conduttore, capace di far passare una certa corrente. Con ciò tale spazio assume una certa resistenza che è solo *apparente*, ma equivalente ad una vera resistenza elettrica. Il valore di tale corrente dipende naturalmente dal numero degli elettroni che partono dal filamento, cioè dalla temperatura di questo.

La lampada precedente fu costruita da Fleming nel 1905, e fu chiamata **diodo.** De Forest, nel 1917, pensò di interporre tra il filamento e la placca un altro elettrodo, che originariamente era formato da una minuta reticella metallica, e fu chiamato perciò la **griglia.** La lampada contiene perciò tre elettrodi: il *filamento*, la *placca*, la *griglia*; da ciò il nome di **triodo.**

La griglia è rappresentata in G nella Fig. 574; ed è connessa con una batteria C di una diecina di *volt*, di cui si può far variare il numero degli elementi, e di cui l'altro polo è connesso col polo negativo del filamento F; un altro milliamperometro M' è inserito in questo nuovo **circuito di griglia.** Se la griglia è ad un potenziale negativo, respingerà gli elettroni (pure negativi) venienti da F, nessuno dei quali arriva alla placca P, e non vi è corrente nè in M nè in M'. Se invece si aumenta il potenziale di G, sino a circa $+20$ *volt*, allora la griglia favorisce ed accresce l'efflusso di elettroni, che attraversandola battono su P, e la corrente in M aumenta fino ad un valore massimo; mentre una corrente più debole è accusata anche dal milliamperometro M'.

Se quindi la griglia è ad un potenziale variabile, si stabilisce una corrente variabile nel circuito di placca: il funzionamento dell'audion consiste tutto in quello.

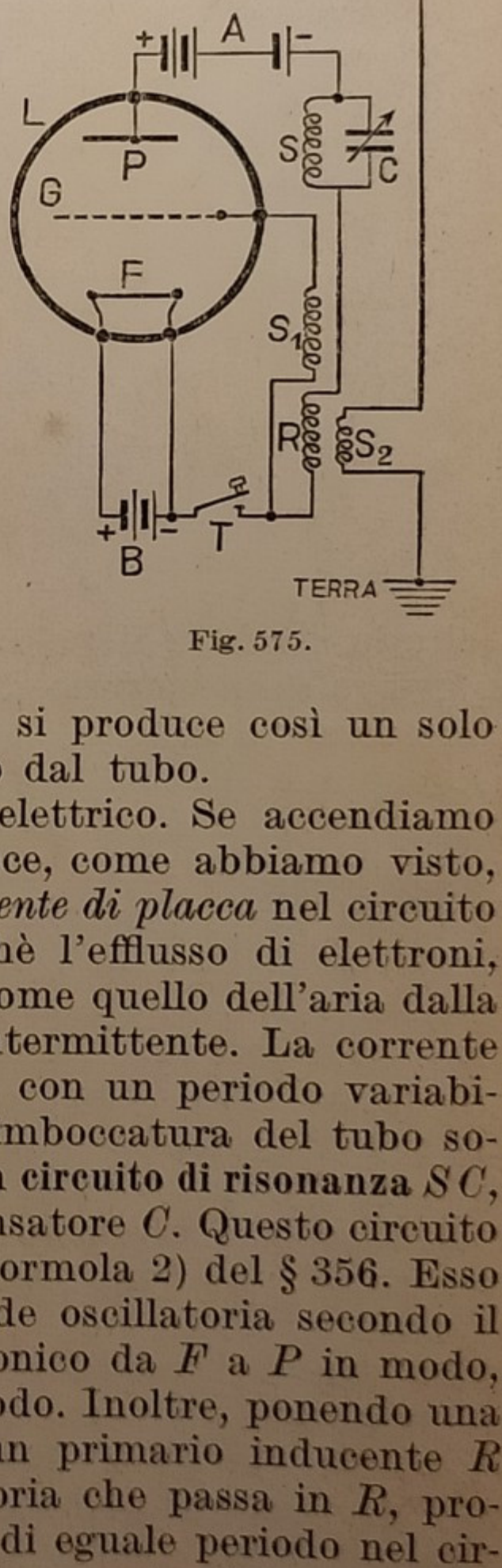


Fig. 575.

365. **L'audion come trasmettitore.** — Per comprendere il funzionamento di un audion come trasmettitore, riferiamoci ad un'analogia acustica. Sappiamo (Vol. 1° - § 387) come funziona un tubo sonoro ad imboccatura di flauto: l'aria soffiata da un mantice, esce vibrando dalla fenditura dell'imboccatura del tubo; le vibrazioni però sarebbero deboli e disordinate e produrrebbero un *sibilo*. Il tubo sovrastante all'imboccatura, nell'accozzaglia di svariati suoni che formano il sibilo, *per risonanza* ne rinforza uno e reagendo sull'efflusso della fenditura lo governa in modo, che l'aria esce vibrando con un determinato periodo e con intensità maggiore; si produce così un solo suono, e di grande intensità, che è quello emesso dal tubo.

Passiamo ora dal fenomeno acustico a quello elettrico. Se accendiamo il filamento F di un audion L (Fig. 575), si stabilisce, come abbiamo visto, un efflusso di elettroni da F a P, e passa una *corrente di placca* nel circuito $PARBF$. Questa non è *corrente continua*, perchè l'efflusso di elettroni, come quello di qualunque fluido da un orifizio e come quello dell'aria dalla fenditura del tubo sonoro, non è continuo ma intermittente. La corrente quindi nel circuito di placca sarebbe oscillatoria, con un periodo variabilissimo; corrisponderebbe al sibilo prodotto dall'imboccatura del tubo sonoro. Ma aggiungiamo ora nel circuito di placca, un **circuito di risonanza** SC, formato da una spirale induttiva S e da un condensatore C. Questo circuito ha un periodo proprio di oscillazione, secondo la formola 2) del § 356. Esso quindi reagisce sulla corrente di placca e la rende oscillatoria secondo il proprio periodo, e governa anche l'efflusso elettronico da F a P in modo, che anch'esso avvenga con quel determinato periodo. Inoltre, ponendo una altra spirale induttiva S_1 sotto l'influenza di un primario inducente R posto nel circuito di placca, la corrente oscillatoria che passa in R, produce per induzione un'altra corrente oscillatoria di eguale periodo nel circuito di griglia; e la griglia G sottoposta così ad un potenziale variabile,

agisce sul flusso elettronico FP e lo governa, rendendo più ampie le oscillazioni del circuito di placca.

Il sistema del *circuito di risonanza* SC e la *reazione* su S_1G, producono quindi lo stesso effetto amplificatore della canna del tubo sonoro.

Si può variare il periodo delle oscillazioni ottenute, variando le quantità che compariscono nella formula 2) § 356; cioè, variando l'*induttanza* di S o la *capacità* C del circuito di risonanza. Solitamente si varia C, facendo uso di un **condensatore variabile**, che non descriviamo. Nello schema della Fig. 575, la freccia che taglia le due lineette parallele che rappresentano le armature del condensatore C, indica appunto che si tratta di un condensatore variabile.

Se ora finalmente poniamo sotto l'influenza di R un altro secondario S_2 di cui un capo comunica con l'*antenna* e l'altro con la terra, per l'induzione di R su S_2, la corrente oscillatoria del circuito di placca ne induce un'altra pure oscillatoria nel circuito *antenna-terra*, e dall'antenna s'irradiano in tutte le direzioni nello spazio le onde elettromagnetiche.

È necessario inoltre **modulare** queste onde; cioè invece di un'emissione continua di onde persistenti, che non potrebbero far vibrare la membrana del telefono ricevitore, occorre un'emissione di onde di intensità variabile secondo la frequenza di un dato suono. Ciò si ottiene per mezzo di **valvole modulatrici** che non descriviamo.

Un *tasto telegrafico* T chiude il circuito di placca per un tempo più o meno breve, corrispondente al punto o linea dell'alfabeto Morse.

Ecco dunque come questi segnali possono partire ed andare lontano nello spazio, con la velocità di 300 000 km. al s., senza bisogno di alcun filo che li porti. È questa la *telegrafia senza fili*, che il nostro Marconi in poco tempo ha portato a conseguire i risultati meravigliosi odierni; per i quali si può oggi telegrafare da un punto all'altro della Terra, o sul mare, o nell'aria, senza limiti di distanza.

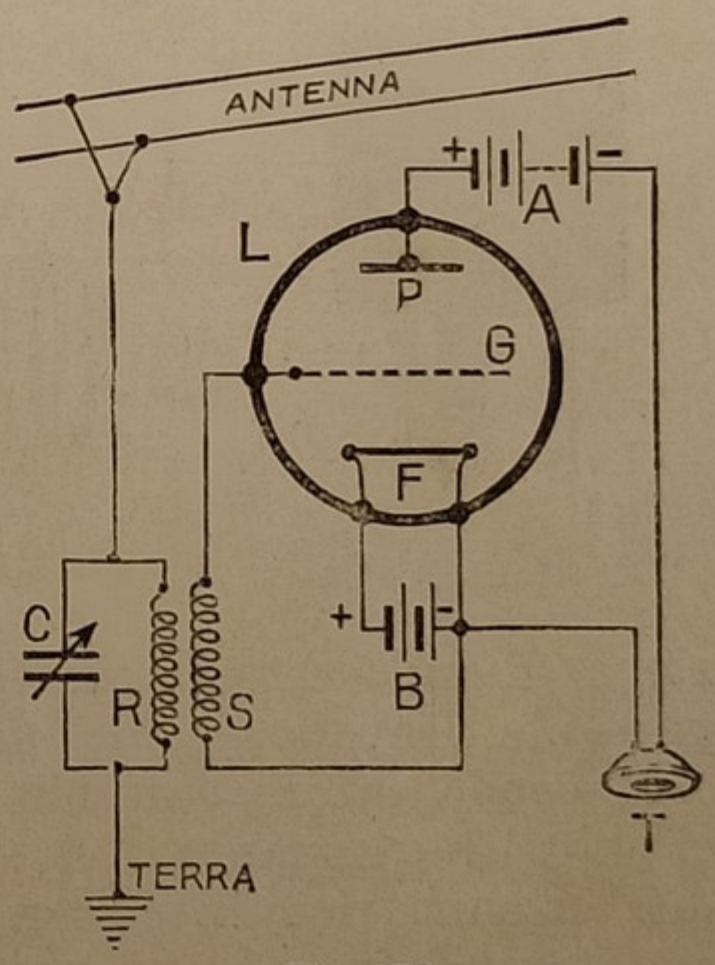


Fig. 576.

366. **L'audion come ricevitore.** — Si abbia ora l'antenna di una stazione ricevente (Fig. 576), posta in comunicazione con la terra, attraverso un circuito di risonanza CR; per l'azione delle onde elettromagnetiche che raggiungono l'antenna, si stabilisce in questo circuito una corrente oscillatoria variabile; la quale provoca sul secondario S per induzione un'altra corrente egualmente variabile, ed il potenziale della griglia di un triodo L assume anch'esso un valore variabile. Si stabilisce in conseguenza, come si è spiegato avanti, nel circuito di placca una corrente di intensità variabile, che agisce su un ricevitore telefonico T inserito nel circuito di placca; T allora emette un suono. In tal modo agisce sul telefono una corrente, la cui variazione è molto più forte sia di quella diretta dell'antenna, sia di quella che si poteva ottenere col *detector* a galena. Cioè l'audion è un rivelatore di onde assai più sensibile e più potente degli altri *detector*.

Inoltre l'audion può agire come **amplificatore.** Se la corrente di placca anzichè su un telefono agisce sulla griglia di un secondo audion, nel circuito di placca di questo si ha una corrente variabile, assai più forte, che nel circuito di placca del primo audion, e l'effetto rivelatore è assai amplificato. E così via può ottenersi una nuova amplificazione con un terzo audion, ecc. Onde in questo modo è possibile risentire l'a-

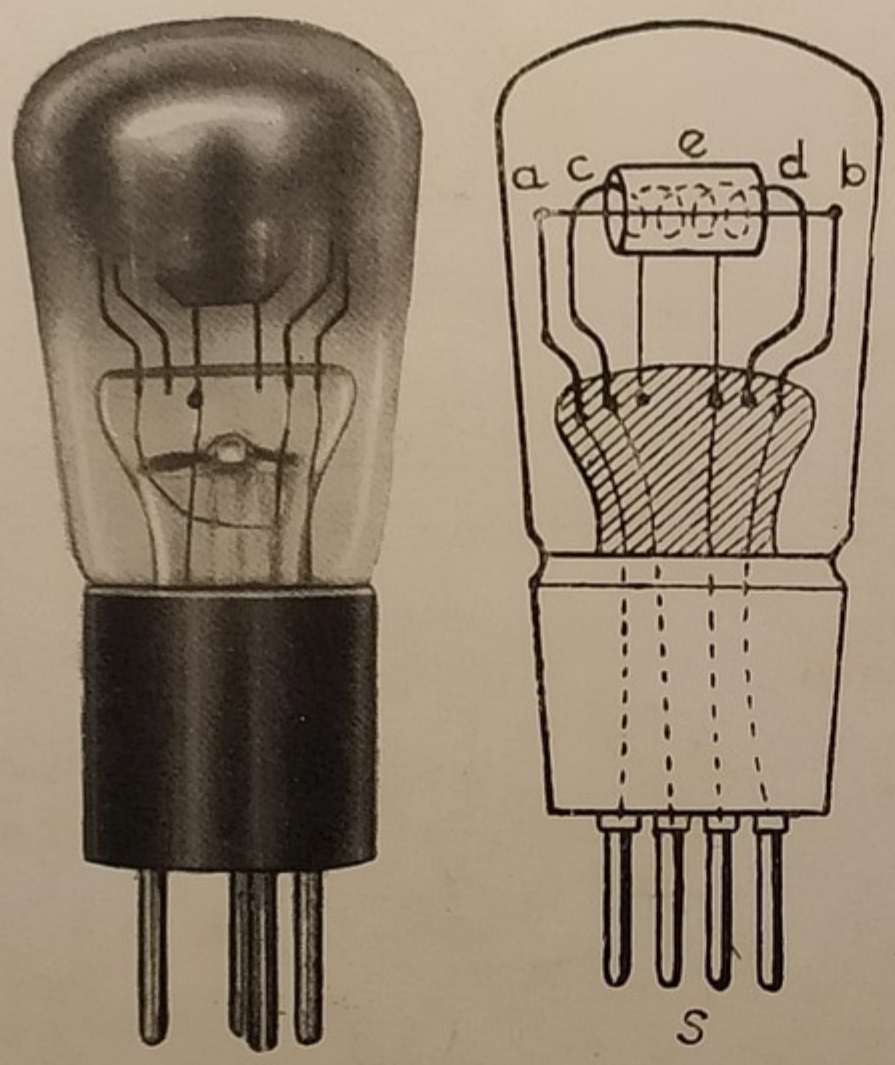


Fig. 577.

Fig. 578.

zione di onde estremamente deboli provenienti da grande distanza ed è possibile ricevere segnali da qualunque punto della Terra.

Il condensatore variabile C, modificando il periodo di oscillazione del circuito di risonanza CR, permette di accordare il periodo del circuito dell'antenna ricevente, con quello delle onde di una data stazione trasmettente; cioè si può accordare una stazione ricevente con una data stazione trasmettente, in modo che riceva i segnali solo di quella e non delle altre, pur agenti contemporaneamente.

La Fig. 577 rappresenta un audion della forma più usata, in sezione e in prospetto: ab è il filamento; cd la griglia, formata da un filo di nichel avvolto ad elica attorno al filamento, senza toccarlo: e è la placca pure di nichel, a forma di tubo. Le comunicazioni opportune si stabiliscono a mezzo di quattro spine nel peduncolo della lampada. Si adoperano anche valvole con più di tre elettrodi (valvola schermata, pentodo, ecc.), che non descriviamo.

Il ricevitore telefonico è doppio, uno per orecchio; i due ricevitori sono riuniti da una molla che li sorregge, e che a sua volta è sostenuta dalla testa (Fig. 578); tutto l'insieme si chiama **la cuffia.**

367. **Radiotelefonia.** — Abbiamo detto che nella radiotelegrafia bisogna modulare le oscillazioni del trasmettitore secondo un dato suono, che è

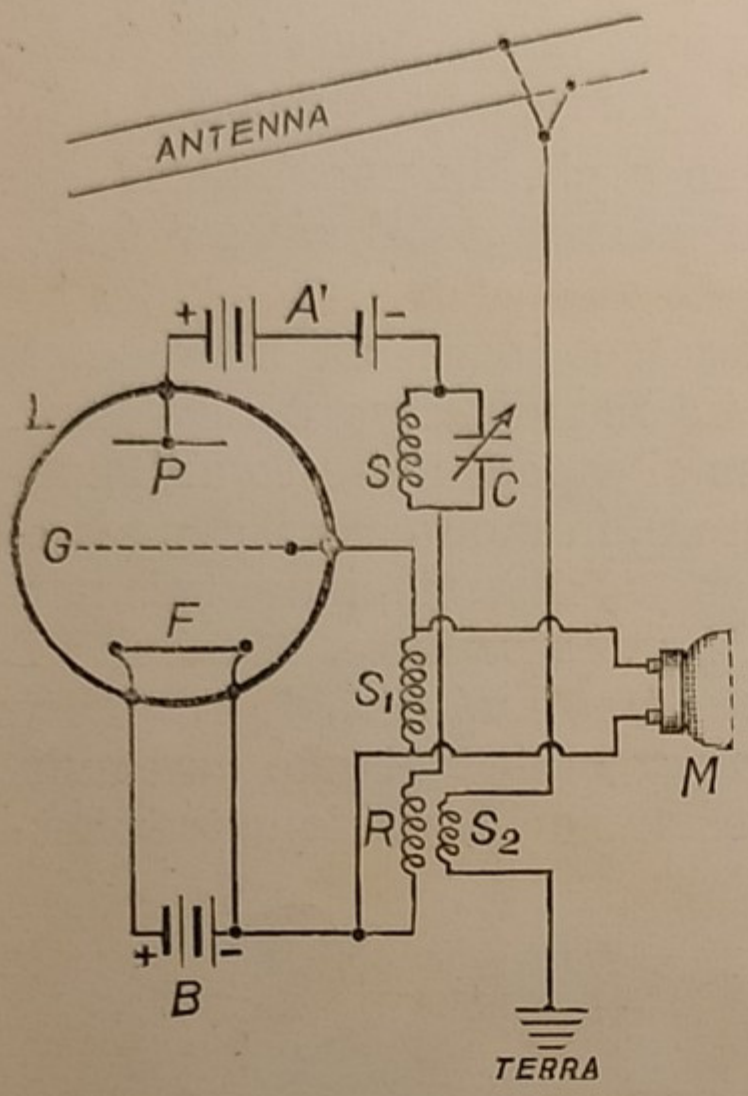


Fig. 579.

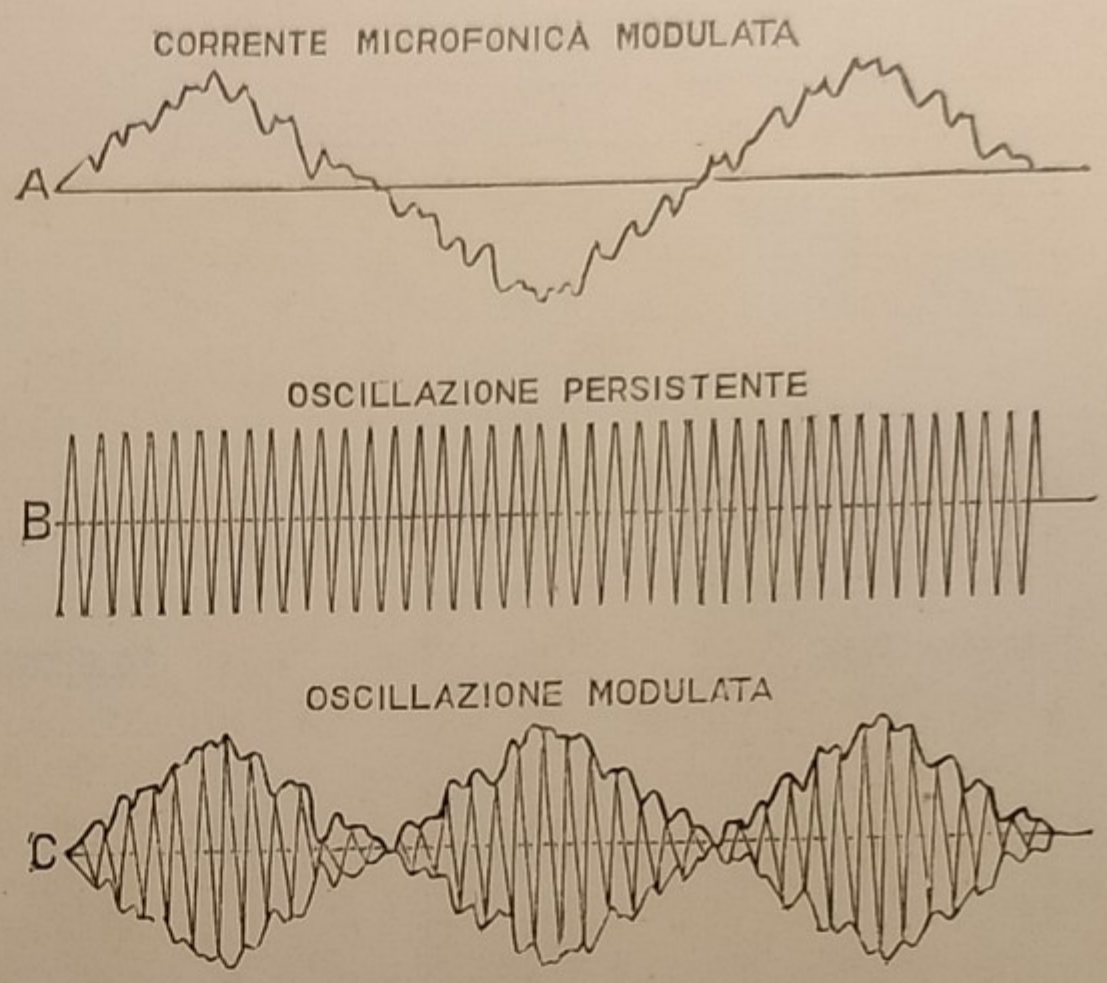


Fig. 580.

quello riprodotto dal telefono del ricevitore. Se ora si modulano le oscillazioni, non per un dato suono, ma per tutti i suoni variabili che costituiscono la musica o la voce, il telefono ricevente ripeterà la musica o la voce. Si avrà in tal modo un sistema di telefonia senza fili, detta comunemente **radiotelefonia.** La maniera di modulare le oscillazioni dell'apparecchio trasmettente, è abbastanza semplice; basta che alla corrente oscillatoria, che percorre il circuito *antenna-terra* dell'apparecchio trasmettente, si sovrapponga l'altra corrente elettrica intermittente che, per azione dei suoni, nasce in un *microfono* avanti a cui si parla (§ 327).

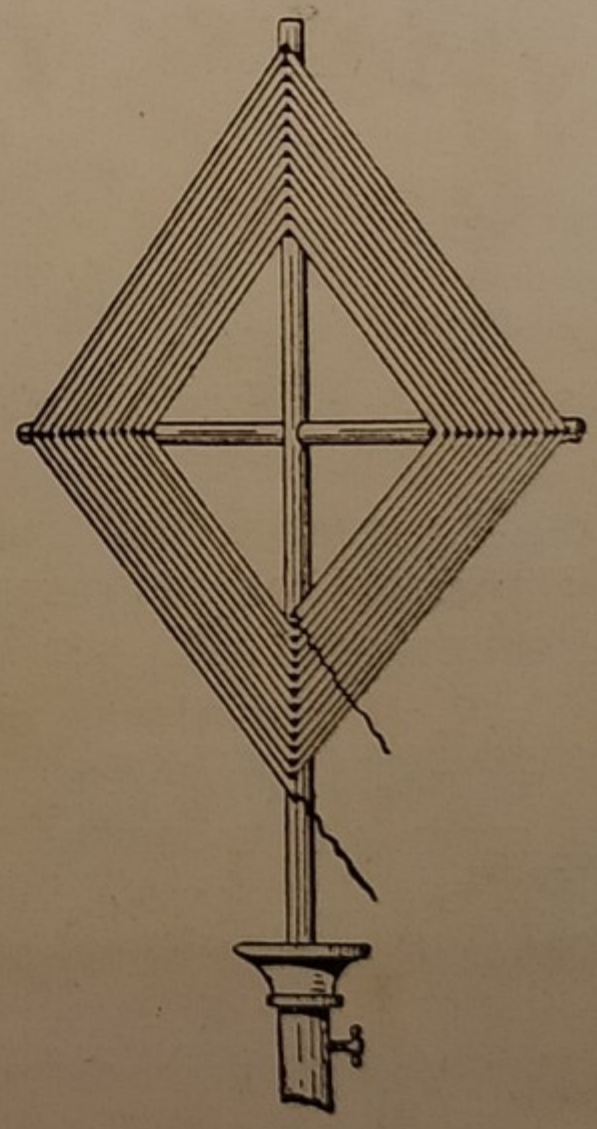


Fig. 581.

L'inserzione del microfono può farsi in diversi modi; sia, ad es., facendolo agire direttamente sul circuito *antenna-terra* dell'apparecchio trasmettente, sia inserendolo nel circuito di griglia della valvola che genera le oscillazioni, ecc. La Fig. 579 indica quest'ultimo caso; il microfono è rappresentato in *M*. La Fig. 580 mostra come si modifica la corrente oscillatoria del trasmettitore, sotto l'azione della corrente del microfono. La curva *A* indica la curva della vibrazione sonora prodotta dal suono emesso avanti al microfono; essa può anche rappresentare la *corrente microfonica modulata* generata dal microfono; la curva *B*, analoga a quella della Fig. 572, indica la curva delle *oscillazioni persistenti* generate dal triodo trasmettente;

queste oscillazioni generano l'**onda portante** emanata dalla stazione trasmettente, allorchè il microfono tace; la curva *C* è quella risultante dalla composizione delle due curve *A* e *B*, ed indica l'*oscillazione modulata*, che parte dal trasmettitore allorquando avanti al microfono si emette un suono.

In pratica una stazione ricevente di radiotelefonia comprende:

1. **L'antenna,** solitamente costituita da uno o più fili paralleli, lunghi una ventina di metri, stesi orizzontalmente ad una certa altezza sul tetto, e bene isolati da questo.

Negli apparecchi recenti l'antenna può essere sostituita da un **quadro,** formato da un telaio di legno, su cui è teso un filo di rame bene isolato (Fig. 581); esso si espone accanto all'apparecchio ricevitore, in modo che il suo piano sia in direzione della stazione trasmettente da cui si vuol ricevere. Munendo il sostegno del quadro di un cerchio graduato e il quadro di un indice, si può così individuare la direzione della stazione trasmet-

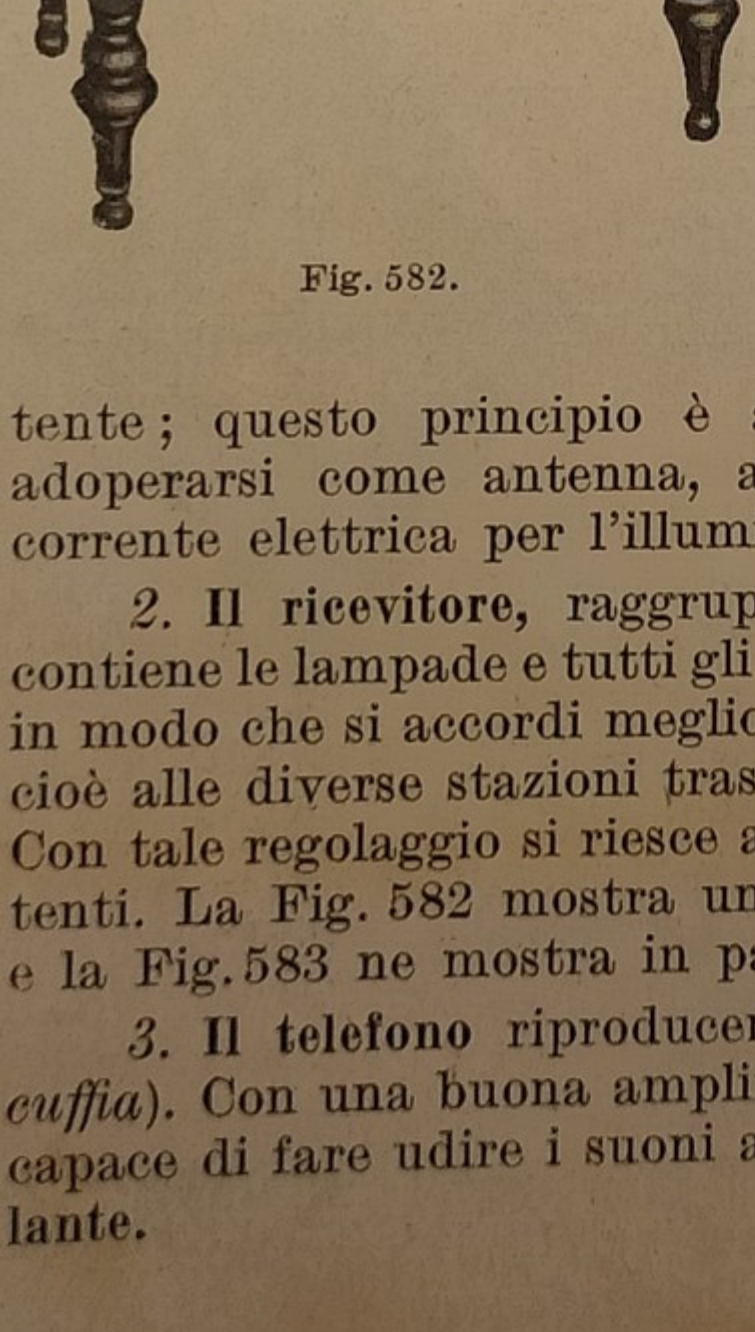


Fig. 582.

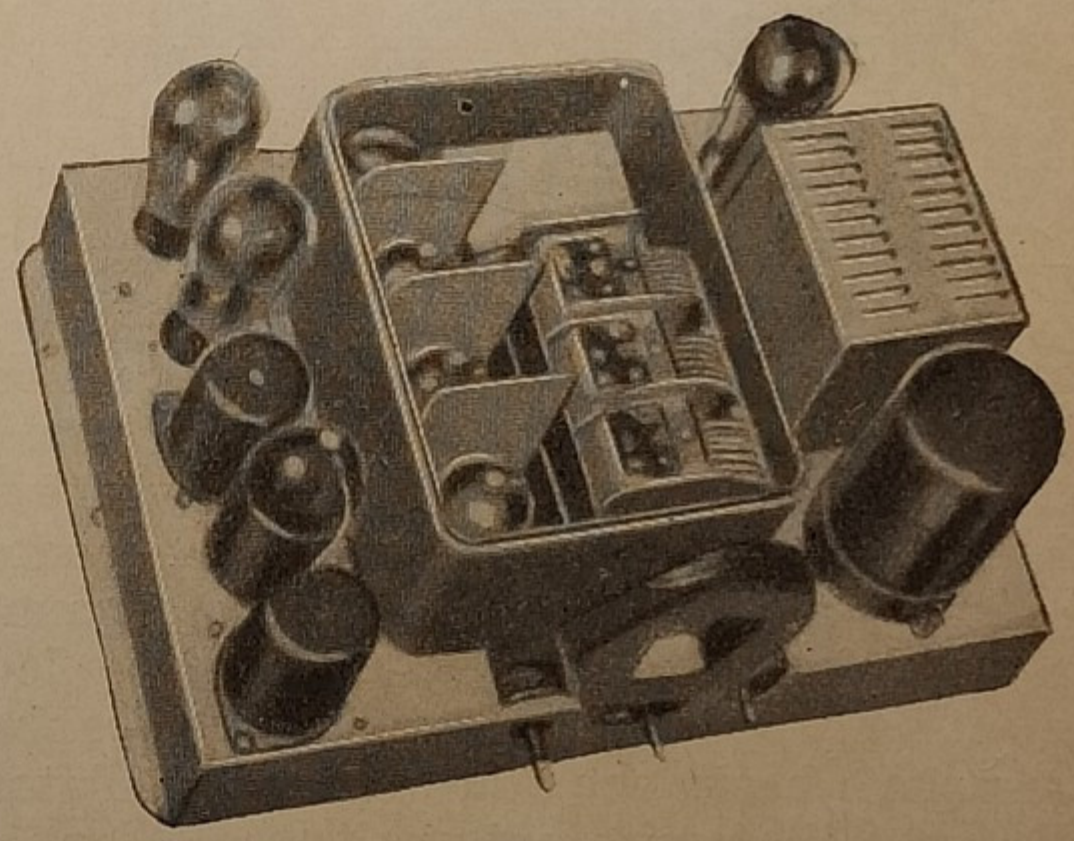


Fig. 583.

tente; questo principio è applicato nei *radiogoniometri*. Talvolta può adoperarsi come antenna, anche la rete stradale di distribuzione della corrente elettrica per l'illuminazione.

2. **Il ricevitore,** raggruppato solitamente in un'unica cassetta, che contiene le lampade e tutti gli elementi occorrenti per regolare l'apparecchio; in modo che si accordi meglio alle diverse lunghezze delle onde da ricevere, cioè alle diverse stazioni trasmettitrici che agiscono contemporaneamente. Con tale regolaggio si riesce a *sentire* solo una tra le stazioni varie trasmettenti. La Fig. 582 mostra un apparecchio ricevitore chiuso in un mobile, e la Fig. 583 ne mostra in parte l'interno.

3. **Il telefono** riproducente i suoni, che quasi sempre è doppio (*la cuffia*). Con una buona amplificazione si può fare anche agire un ricevitore capace di fare udire i suoni a più persone in una sala; si chiama l'**altoparlante.**

Negli apparecchi moderni per radiotelefonia, sono state abolite la batteria per l'accensione del filamento delle valvole e quella anodica, di uso

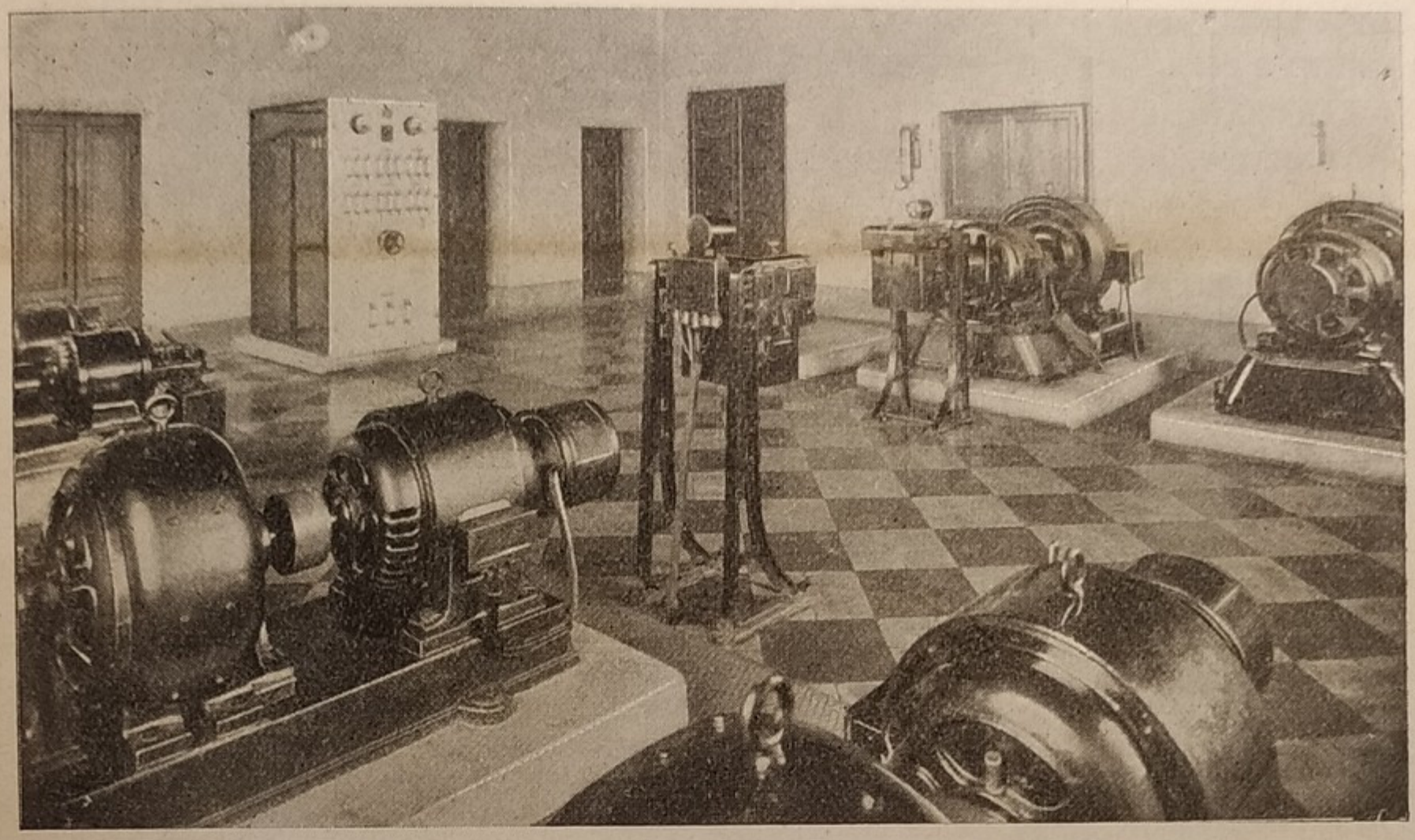


Fig. 584.

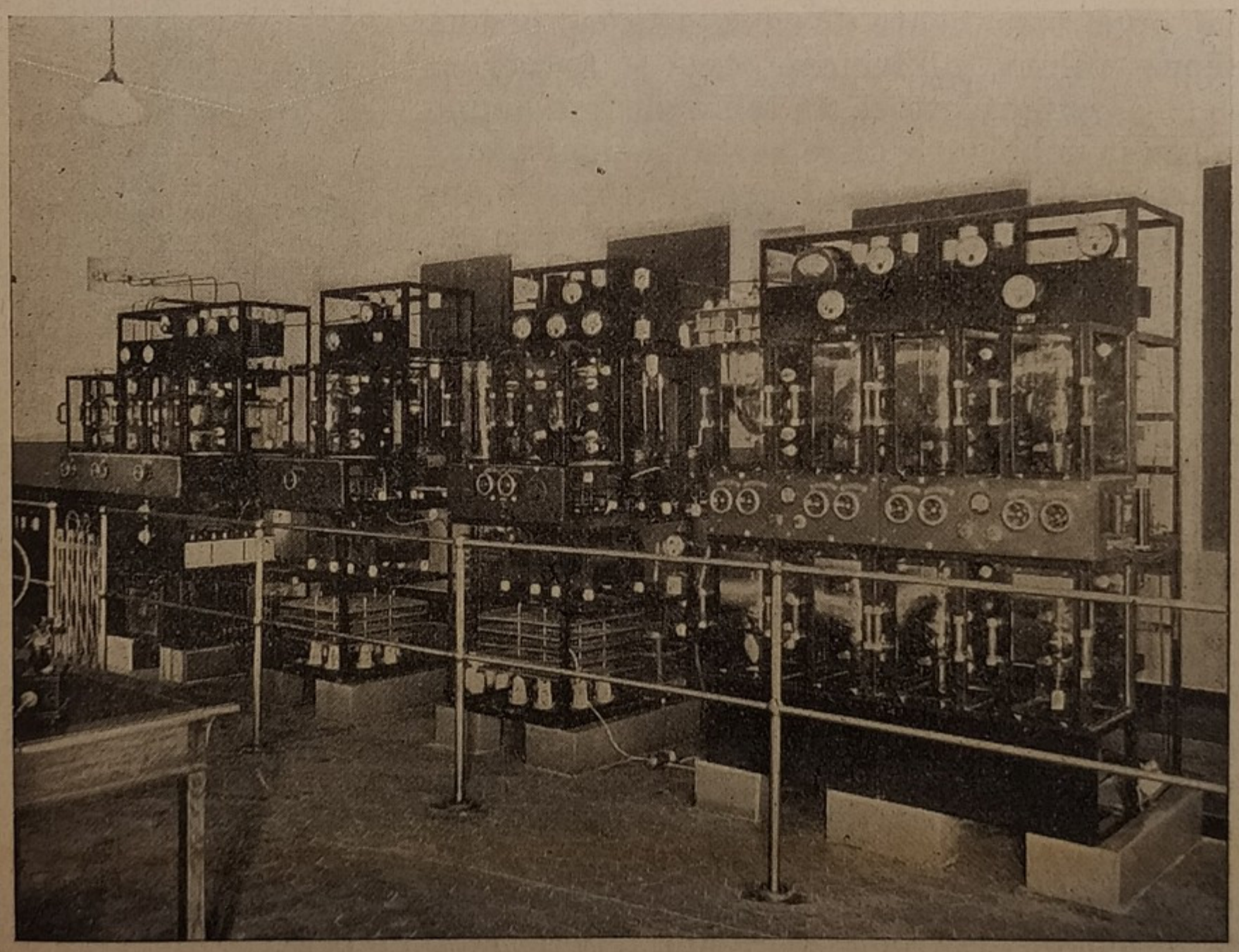


Fig. 585.

assai incomodo. La corrente necessaria per il funzionamento delle valvole, oggi si ottiene con opportuni **alimentatori,** che raddrizzano la corrente

alternata stradale per l'illuminazione, trasformandola in corrente continua di *f.e.m.* adatta. Inoltre si generalizza l'uso di valvole a due griglie, chiamate anche **valvole schermate**, che permettono una maggiore amplificazione del triodo.

Non possiamo diffonderci sulle particolarità di ciascun apparecchio, perchè usciremmo dai limiti imposti ad un trattato elementare.

La Fig. 584 mostra il macchinario della stazione trasmittente E. I. A. R. di Torino, e la Fig. 585 la sala di trasmissione della medesima stazione.

La Fig. 586 mostra una delle grandissime *valvole* per stazione trasmettitrice di grande potenza. Le sue dimensioni si comprendono meglio, paragonandole con quelle di una comune *valvola* per apparecchio ricevente, rappresentata a sinistra.

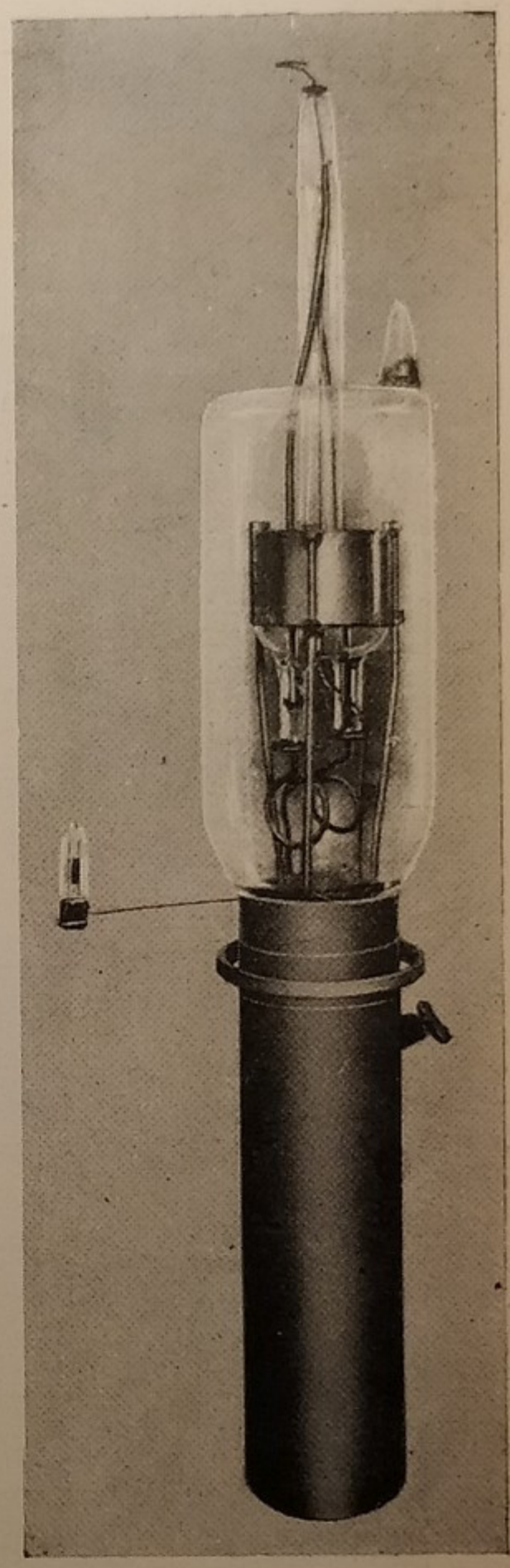


Fig. 586.

368. **Le microonde.** — Le nuove ricerche del Marconi hanno portato all'uso di *onde elettromagnetiche cortissime* o **microonde**, la cui lunghezza è di qualche decimetro, che possono perciò opportunamente dirigersi a fascio in una direzione voluta, all'incirca come si fa per la luce coi comuni riflettori. Su tali onde non hanno influenza la nebbia e le altre perturbazioni agenti sulle onde più lunghe, onde permettono comunicazioni chiarissime con potenza limitatissima, e le trasmissioni diventano assai facili ed economiche. Il raggio di azione di tale trasmissione è per ora di qualche centinaio di km. È in funzione un impianto recentissimo di radiotelefonia con le microonde tra il Vaticano e Castel Gandolfo, inaugurato nel febbraio 1933.

369. **Televisione.** — La cellula fotoelettrica, di cui abbiamo dato il principio nel § 213, è stata applicata in molti e svariati usi della vita pratica; come, ad es., in apparecchi avvisatori di furti o del passaggio di veicoli, in accenditori automatici di lampade al principio della sera, in sistemi di allarme, ecc.

La più bella e la più interessante applicazione è quella della **televisione**, cioè della *trasmissione delle immagini a distanza*.

Per ottenere questo, la luce proveniente successivamente dai varî punti di un'immagine (che può essere una fotografia, o un oggetto qualsiasi anche in movimento) viene fatta cadere sulla superficie di potassio di una *cellula fotoelettrica*, in cui si genera così una corrente elettrica variabile, come è variabile l'intensità della luce proveniente dai punti dell'immagine da trasmettere. Questa corrente o si trasmette per un filo telefonico usuale

(**telestereografo Belin**), oppure agisce su un oscillatore generatore di onde elettromagnetiche, come quello adoperato per la radiotelefonia, che lancia

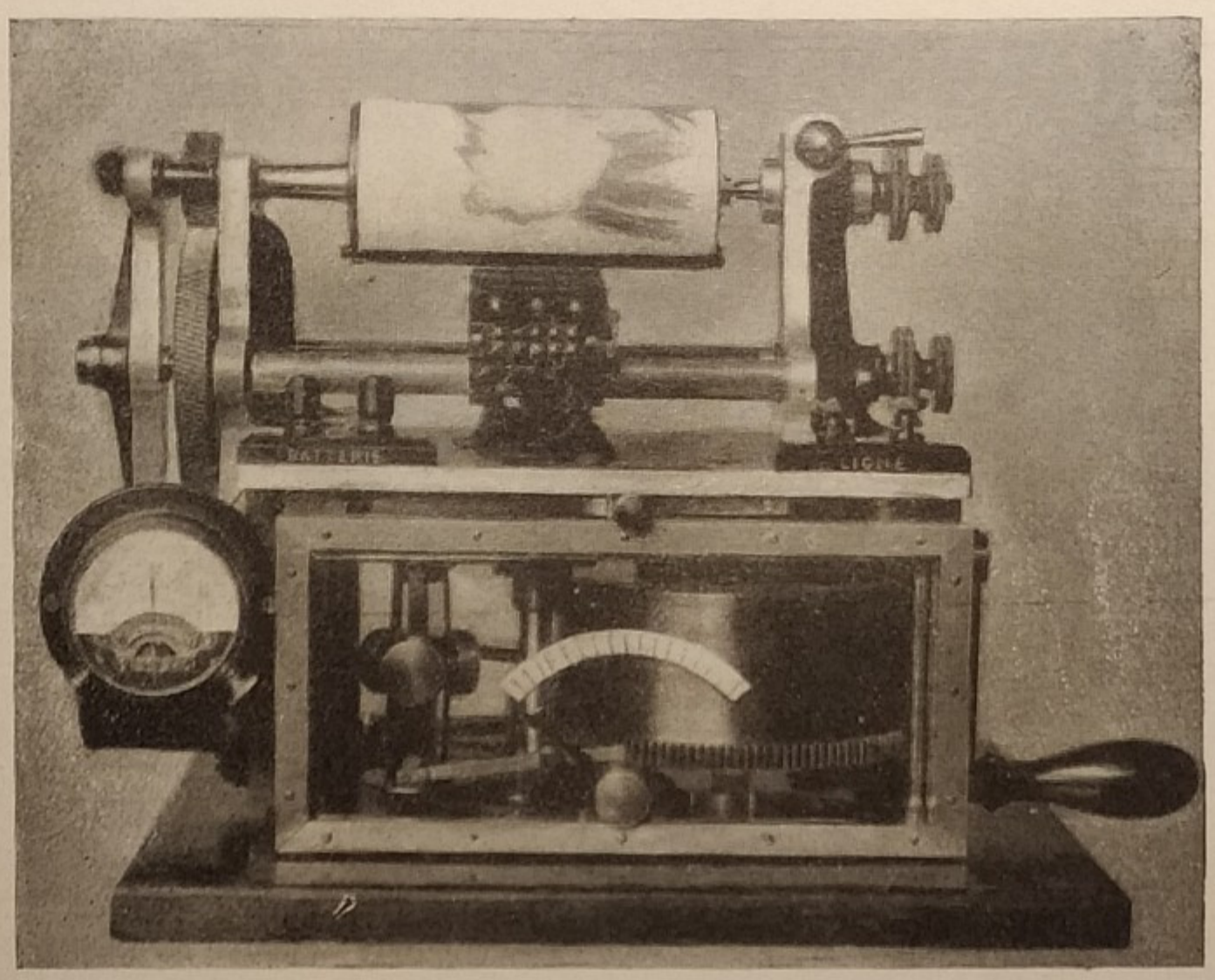


Fig. 587.

nello spazio onde di intensità variabile. Nel secondo caso le onde sono ricevute in una stazione ricevitrice lontana, e per mezzo di **lampade al neon** speciali (simili a un *tubo di Geissler*, § 204), sono trasformate in luce di intensità egualmente variabile; cioè di intensità corrispondente a quella dei varî punti dell'immagine trasmessa. Questa luce, concentrata nei varî punti della superficie di uno schermo, vi riproduce l'immagine trasmessa. Il procedimento, già adoperato con ottimi risultati per le trasmissioni di immagini fisse [1] (fotografie, disegni, ...), non è ancora sufficientemente perfezionato per la trasmissione delle immagini di oggetti in moto. Ma è prevedibile che in un non lontano avvenire, esso sarà altrettanto diffuso, come è la radiotelefonia oggi.

Fig. 588.

La Fig. 587 mostra un apparecchio trasmettitore Belin, per linea telefonica, portante la fotografia da trasmettere. Oggi questi apparecchi trasmet-

(1) In Italia funziona normalmente per il pubblico un tal servizio tra Roma e le principali capitali europee, nonchè tra Roma e New-York.

titori sono di dimensioni così ridotte, da potersi trasportare in una valigia; i cronisti dei maggiori giornali possono in tal modo inviare in brevissimo tempo le fotografie degli avvenimenti da qualunque luogo per il quale passi una linea telefonica o telegrafica.

Fig. 589.

La Fig. 588 mostra l'immagine di una fotografia ricevuta per filo nel modo ora descritto; e la Fig. 589 l'immagine in movimento di persone viventi, trasmessa per radio da New-York a Londra. Non possiamo ancora descrivere, in un trattato elementare di Fisica, gli apparecchi che si adoperano per questo scopo.

370. **Cinema sonoro.** — Un'altra bellissima applicazione della cellula fotoelettrica è il **cinema sonoro**, che in pochi anni ha conquistato largamente le folle; poichè riproduce i suoni e la parola contemporaneamente alle immagini in movimento. Ciò si ottiene nel seguente modo:

I suoni prodotti vengono raccolti da un *microfono*, la cui corrente intermittente (§ 327) agisce su una lampada al neon, che si illumina con luce intermittente, di intensità variabile secondo le vibrazioni sonore. Questa luce impressiona una stretta striscia laterale AB (Fig. 590), della pellicola che contiene le immagini fotografiche della scena da riprodurre; in tale striscia così rimane impressa una successione di righe più o meno oscure. Per riprodurre il suono, allorchè la pellicola si svolge nella macchina cinematografica che la proietta sullo schermo, si fa passare attraverso la striscia AB un sottile fascio di luce proveniente da una lampadina elettrica. Questa luce è resa in tal modo di intensità variabile e colpisce una *cellula fotoelettrica*, nella quale le variazioni di luce si traducono in variazioni di corrente elettrica. Questa corrente variabile, opportunamente amplificata con audion, come per la radiotelefonia, agisce su un altoparlante, che emette il suono.

Fig. 590.

371. **Il presente e l'avvenire delle radiotrasmissioni.** — Chi non conosce l'enorme sviluppo odierno delle *radiotrasmissioni*? Nessuna altra invenzione ha avuto una affermazione così rapida e completa come la **Radio**. Essa oggi non serve soltanto per la trasmissione dei dispacci da un punto all'altro della Terra; per invocare aiuto da una nave pericolante nell'oceano; per mantenere in comunicazione con la patria l'esploratore sperduto nelle gelide solitudini del polo o negli sconfinati deserti equatoriali. La **Radio** oggi è un poderoso mezzo di cultura e di educazione. Ben lo ha compreso il nostro Governo nazionale, che con grande interessamento e con modernità di vedute, ha voluto concedere a questa nuova branca di applicazioni elettriche, protezione ed aiuti; ha voluto che sia universalmente diffusa nel regno la *radiotelefonia*, favorendo l'impianto di numerose stazioni trasmettenti, tra le quali alcune tra le più moderne e le più potenti del mondo.

Fig. 591.

La radiotelefonia ha invaso tutti i campi della vita moderna. Non vi è casa ormai in cui non vi sia un apparecchio ricevente: dalla semplice cuffia del *galenista* che non richiede valvole, nè batterie, nè congegni ingombranti, ma che si limita a far sentire solo la *stazione locale* sino a qualche chilometro di distanza; alla complicatissima *supereterodina* a 9 valvole, che permette la recezione da ogni parte del mondo. Durante il giorno, meglio di sera, il giro di un bottone ci permette di ascoltare immediatamente quanto le onde ci portano dalle nostre stazioni o da quelle estere. Così possiamo sentire a piacere o la musica orchestrale che ci trasmette Torino; o il canto dell'opera che si dà alla Scala di Milano; o la conferenza scientifica che ci giunge da Napoli, o il discorso politico del Duce irradiato dalla stazione ultrapotente di Roma; o il concerto da Parigi, o una lezione di tedesco da Berlino; abbiamo persino ascoltato la voce del Papa irradiata in tutto il mondo all'inaugurazione della stazione del Vaticano. E se ciò

non bastasse, apprenderemo con le nostre orecchie la bontà dell'olio X, o le virtù del purgante Y, o che il lucido per scarpe Z è senza rivali... La radio ci fornisce l'ora esatta per regolare i nostri orologi; ci dà le notizie

Fig. 592.

Fig. 593.

di tutto il mondo, che i giornali pubblicheranno solo domani; ci grida le quotazioni di Borsa, i risultati delle corse, le vittorie sportive dei nostri giovani atleti, ecc., ecc.

Tutto ciò non solo a casa nostra, ma ovunque ci troviamo: o al caffè, o al circolo, o in campagna mentre facciamo colazione sull'erba, o in treno

comodamente seduti al nostro posto, (Fig. 591), o in automobile mentre ci rechiamo da una città ad un'altra, o sul piroscafo che ci conduce lontano, o in dirigibile, o in aeroplano, ovunque si vuole, senza eccezioni e senza difficoltà.

« *È proprio la visione che io ebbi sulle vaste possibilità della* **Radio** *e che mi pareva quasi un sogno* — disse Marconi qualche anno addietro — *quelle meraviglie alle quali assisto. Essa porta il mondo della musica, della cultura, della conoscenza, in tutte le case, con la freschezza della voce umana; e risolve tutti i problemi della solitudine e dell'isolamento* ».

La **televisione**, che ha già superato gli inizi di una prova scientifica e i limiti del laboratorio sperimentale, per irrompere nel campo della pratica, permette oggi ai giornali illustrati di riprodurre fotografie di avvenimenti lontani, appena un'ora dopo che essi siano avvenuti, (la Fig. 592 mostra una fotografia della regate di Southampton, in Inghilterra, ricevuta per filo, come è stata riprodotta da un giornale di Parigi). Essa si accompagnerà tra pochi anni alla **Radio**, e ci permetterà di ascoltare e di vedere contemporaneamente tutti gli avvenimenti che si produrranno nel mondo (Fig. 593). Ciò è certamente meraviglioso; ma l'avvenire della **Radio** non si arresta alle conquiste odierne. Nessuno può prevedere ciò che essa ci porterà domani; ma certamente si può affermare che l'avvenire della **Radio** è senza limiti.

Fig. 594.

Gli sforzi dei tecnici sono diretti alla **Radiomeccanica**; cioè al comando a distanza di meccanismi azionati dalle radioonde. Dai primi tentativi del 1918, in cui si riuscì a far volare per quasi un'ora un aeroplano senza pilota, guidato da terra con le onde elettromagnetiche, anche in questo campo se n'è fatta della strada: negli Stati Uniti una corazzata, senza una sola persona di equipaggio, ha compiuto difficili evoluzioni; andando avanti, indietro... docile al comando che le veniva con le radioonde, da una nave a parecchi chilometri di distanza.

Recentemente a Chicago si è vista circolare per le vie affollate una automobile vuota; il conduttore si trovava su un'altra automobile, che la seguiva a distanza di una trentina di metri. Certamente una guerra futura si ser-

virà delle radioonde per dirigere un siluro contro una corazzata, o per indirizzare su un centro nemico un convoglio di aeroplani, senza pilota, ma carichi di esplosivi. Nel marzo 1930 il nostro Marconi da Genova a bordo del suo *yacht* « **Elettra** », che il poeta D'Annunzio chiamò « *la candida nave che naviga nel miracolo e anima i silenzi* », manovrava con le radioonde un interruttore elettrico posto agli antipodi, accendendo tutta una festa di luce per illuminare l'esposizione di Sidney in Australia! (Fig. 594).

Che avverrà allorquando si riuscirà a trasmettere con le onde, non la infinitesimale energia che impressiona la valvola di un ipersensibile ricevitore radiofonico moderno, ma addirittura energie industriali, capaci di far girare un motore, di spingere un radioveicolo, di muovere un radiotreno, di trasportare sull'oceano una radionave? Non si troverà forse nella **Radio** la forza spaziale che condurrà un veicolo sulla luna? Cose da romanzo! ma quante utopie di ieri non sono oggi la realtà? Non aspettiamoci adunque che l'avvenire della **Radio** consista solo nell'abolizione dei giornali sostituiti dal cono di un altoparlante, o nella scuola a domicilio, o nel teatro in casa, ecc. Altri campi più vasti, altri orizzonti più larghi ci addita e ci promette la grande invenzione, nata dai semplici e modesti esperimenti, che il diciannovenne Marconi iniziava 40 anni addietro.

Le onde misteriose che in tutti i sensi s'incontrano, s'intersecano, s'inseguono nell'atmosfera sconfinata, cingono già la Terra di una cintura di energie, invisibile eppure stranamente viva, che meglio di ogni altra ingentilisce le genti ed affratella i popoli. L'influenza della **Radio** nella civiltà mondiale è la più grande che siasi finora avuta nella storia dell'uomo. Nè per le radioonde si prevedono limiti di spazio; nulla può arrestare nello spazio la fulminea corsa dell'elettricità radiante; forse ancora oggi esse hanno sorpassato l'involucro gassoso che circonda la Terra, ed hanno varcato gli enormi spazi interplanetari; se non l'hanno fatto oggi, lo faranno certamente domani. Pensate al momento in cui riceveremo i segnali che ci invieranno gli abitatori dei mondi astrali lontani? Cos'è dunque che non dovremo attenderci dalla **Radio**?

Problemi da risolvere.

1. Calcolare il numero delle vibrazioni corrispondenti alle lunghezze d'onda: m. 0,50 (*microonde*), m. 35 (*onde corte*), m. 450 (*onde medie*), m. 1200 (*onde lunghe*), adoperate nelle radiotrasmissioni.

2. Ricordando la definizione del metro e la velocità delle radioonde, calcolare: Quanto tempo impiegherebbe un segnale radiotelegrafico ad arrivare sulla Luna (distanza tra la Terra e la Luna = 60 raggi terrestri), o sino al Sole (distanza 150 milioni di km.)?

3. Calcolare per quale frequenza risuona un circuito la cui induttanza è di 1200 μh, e la cui capacità è di 0,0002 μf.

4. Due circuiti di eguale induttanza, risuonano rispettivamente per le lunghezze d'onda λ e λ'. Calcolare quale dev'essere il rapporto tra le loro capacità.

Elettricità atmosferica.

372. **Potenziale elettrico dell'atmosfera.** — L'aria contiene sempre dell'elettricità, anche con tempo sereno. Si ponga un elettroscopio in comunicazione con una fiamma o con una sostanza radioattiva posta nell'aria, in modo che la parte circostante di questa sia resa conduttrice e convogli l'elettricità all'elettroscopio; questo segna allora un potenziale elettrico, che può elevarsi anche a qualche migliaio di *volt*, specialmente a grande altezza e sulle alte montagne. Il potenziale cresce cioè con l'altezza.

Fig. 595.

Si è osservato che l'elettricità dell'atmosfera è quasi sempre positiva; e che l'aumento del potenziale atmosferico con cielo sereno e vicino al suolo, può essere da 80 ad 800 *volt* per metro, con una media di circa 300 *V*. Questo **gradiente** però diminuisce con l'altezza: a 1500 m. d'altitudine è appena di 36 *V* per metro, e a 4000 m. non è più che di 13 *V* per m. Con nubi e in tempo di pioggia la cosa è molto diversa; potendosi avere variazioni instantanee anche di un migliaio di *volt* e perfino variazioni nel segno di elettrizzazione. L'origine di questa elettricità non è ancora ben nota, sebbene siano state fatte parecchie ipotesi per spiegarla; probabilmente sarà negli sciami di elettroni che provengono dalla radioattività della Terra, o che arrivano dal Sole.

373. **Lampi e tuoni.** — Le nubi temporalesche sono cariche d'elettricità a diverso potenziale. Non è ancora ben nota la causa di tale elettrizzazione; la si attribuisce all'evaporazione, o allo strofinio delle masse di nubi contro l'aria, o ad altre cause più complesse.

Se fra due nubi vi è sufficiente differenza di potenziale, si forma una scintilla, che costituisce il **lampo** (Fig. 595); il **tuono** è il rumore prodotto dalla

scarica, reso prolungato e roboante da scariche successive fra nuvole consecutive, e da fenomeni di riflessione del suono tra varie nubi, o fra queste e la terra. Il tuono si percepisce dopo un certo tempo dal lampo, perchè il suono si propaga più lentamente della luce. Poichè il suono percorre 333 m. al secondo, cioè $\frac{1}{3}$ di km, contando il numero dei secondi che intercedono tra il lampo ed il tuono e dividendo tale numero per 3, si ottiene con approssimazione la distanza in km. dal punto in cui è avvenuto il lampo.

374. **Fulmine.** — Se una nube temporalesca, carica di elettricità solitamente positiva, è vicina alla terra, questa si elettrizza per influenza (§ 166), sotto la nube di segno contrario (negativamente); si stabilisce perciò tra nube e terra una differenza di potenziale che può produrre la scarica.

Fig. 596.

Questa allora costituisce il **fulmine**, ed è accompagnata da tutti gli effetti, intensificati, della scarica elettrica; perciò il fulmine abbatte e incendia gli alberi, fa diroccare una casa, lancia gli oggetti lontani, uccide persone e interi armenti. La Fig. 596 mostra in che stato fu ridotto un albero colpito dal fulmine.

375. **Parafulmine.** — Franklin [1] trovò il modo di proteggere gli edifizi dal fulmine, mediante il **parafulmine**. Esso è costituito da un'asta verticale *A* di ferro, posta sul tetto dell'edifizio, (Fig. 597). All'estremità superiore termina con una o più punte di oro e di platino; cioè di metallo inalterabile alle intemperie, perchè si conservi aguzza la punta. Alla base dell'asta è attaccata una corda di rame *R*, che scende lungo la parete dell'edificio e va a finire in una lastra di rame *L* immersa in un pozzo; cioè il parafulmine è messo in buona comunicazione con la terra.

---

(1) Franklin Benjamin; n. presso Boston nel 1706, m. a Filadelfia nel 1790.

Il parafulmine ha doppia azione:

1. **Azione preventiva.** Previene il fulmine perchè l'elettricità negativa della terra, per il potere delle punte (§ 174), sfugge dal parafulmine e va sulla nube, neutralizzando a poco a poco l'elettricità positiva di questa e scaricandola.

2. **Azione protettiva.** Se ciò nonostante la scarica avviene, cade di preferenza sul parafulmine, che è la parte più vicina alla nube; e l'elettricità, per la corda di rame si disperde al suolo, senza recar danno.

Fig. 597.

L'azione del parafulmine non è sicura. La scarica può essere talvolta oscillatoria (§ 356): in tal caso l'elettricità non si propaga facilmente nei metalli. La corda di rame può assumere un'impedenza così grande (§ 339), che la scarica preferisce dal parafulmine abbattersi sull'edifizio, anzichè seguire la via del rame.

Si attenua questo inconveniente moltiplicando, sia il numero delle aste del parafulmine (che si faranno poco alte sul tetto), sia le condutture di comunicazione con la terra; e queste si collegheranno con tutte le parti metalliche dell'edifizio (grondaie, ringhiere, ecc.).

Per raggiungere una protezione assoluta si dovrebbe rivestire l'edificio con un involucro metallico, o almeno con un reticolato di metallo, perchè abbiamo visto (§ 171), che un conduttore cavo protegge il suo interno da qualunque azione elettrica esterna.

Ciò non si fa per gli edifizi comuni per il grande costo, sproporzionato alla probabilità del pericolo; si fa invece per proteggere le capanne-rifugio in alta montagna, ove le scariche elettriche sono assai frequenti.

Occorre assicurarsi, almeno una volta l'anno, che l'impianto del parafulmine sia in efficienza. Spesso per incuria, dopo qualche anno, la corda di rame si sarà corrosa e rotta in qualche punto, ed il parafulmine non è più in buona comunicazione con la terra. In questo caso invece che proteggere il parafulmine è di pericolo; attirando sull'edifizio delle scariche che forse, senza il parafulmine, non sarebbero avvenute.

Allorchè vi è temporale, vi è meno pericolo in casa che fuori: il pericolo è minore se i muri esterni sono bagnati, cioè conduttori. È imprudente ripararsi dalla pioggia sotto grandi alberi, specialmente di quercia, che più facilmente sono colpiti dal fulmine; è pericoloso suonare le campane, perchè la scarica può scendere sulle persone per la corda bagnata. È un pregiudizio che un lume acceso, uno specchio, *attirino* il fulmine. Ai fulminati si pratichi la respirazione artificiale (§ 201).

Occorre osservare che se il fulmine cade ove sono radunate parecchie persone, solo una è colpita direttamente dalla scarica. Le altre rimangono

fulminate per il cosiddetto **contracolpo**; nel punto in cui avviene la scarica, la terra si diselettrizza; tutte le persone che sono in quel luogo passano istantaneamente dal potenziale altissimo (negativo) a cui si trovavano, al potenziale zero, e subiscono perciò eguale effetto che se fossero attraversate direttamente dalla scarica.

376. **Aurore polari.** — Di frequente nelle regioni polari il cielo si rischiara di notte; dalla volta celeste si vedono pendere larghe cortine di luce violacea (Fig. 598), di apparenza variabile; a questo fenomeno luminoso si è dato il nome di **aurora polare**, per il chiarore che acquista il cielo, simile a quello dello spuntare del Sole.

Fig. 598.

I movimenti disordinati che acquista l'ago calamitato allorchè si produce questo fenomeno, e l'apparenza della luce simile a quella delle scariche nei gas rarefatti, fanno pensare che si tratti di un fenomeno elettrico. Si suppone cioè che la luce sia dovuta a scariche che avvengono nell'alta atmosfera, a circa 100 km. di altezza, ove l'aria è già più conduttrice perchè rarefatta, e la conducibilità sia accresciuta casualmente per ionizzazione dovuta a cause non ben note.

Birkeland (nel 1896) attribuiva questa ionizzazione a sciami di elettroni provenienti dal Sole, emessi in momenti di massima attività; questo flusso di elettroni, sotto l'azione magnetica della Terra, s'incurva (§ 205 - 6) e si concentra, formando una specie di risucchio in prossimità delle regioni polari, e producendovi l'aurora polare.

Più recentemente (1928) Hulburt suppose, che la ionizzazione dell'aria potesse esser prodotta dai raggi ultravioletti solari.

INDICE

Parte IV.

OTTICA

OTTICA GEOMETRICA

Propagazione della luce.

1. Luce - Sorgenti luminose . . . *Pag.* 1
2. Corpi trasparenti ed opachi . . » 1
3. Propagazione rettilinea della luce » 2
4. Ombra . . . . . » 3
5. Penombra . . . . . » 3
6. Camera oscura . . . . . » 5

Velocità della luce.

7. Velocità della luce - Metodo di Roemer . . . . . » 6
8. Metodo di Fizeau . . . . . » 8
9. Metodo di Foucault . . . . . » 9
10. Conseguenze sulla velocità della luce . . . . . » 10

Riflessione della luce.

Leggi della riflessione.

11. Assorbimento - Riflessione - Diffusione - Rifrazione . . . . . *Pag.* 11
12. Leggi della riflessione . . . . . » 11

Specchi piani.

13. Immagine virtuale . . . . . » 13
14. Immagine di un oggetto . . . » 13
15. Rotazione dello specchio . . . » 14
16. Specchi ad angolo . . . . . » 15
17. Specchi paralleli - Immagini multiple . . . . . » 16
18. Applicazione degli specchi piani » 17

Specchi sferici.

19. Specchi ricurvi . . . . . » 19
20. Specchi sferici concavi . . . . » 19
21. Formula dei punti coniugati . » 21
22. Fuoco . . . . . » 21
23. Posizione di un punto e della sua immagine . . . . . *Pag.* 22
24. Punto fuori dell'asse principale - Piano focale . . . . . » 24
25. Costruzione grafica dell'immagine . . . . . » 25
26. Ingrandimento . . . . . » 27
27. Specchi convessi . . . . . » 28
28. Applicazione degli specchi curvi - Proiettori . . . . . » 30

Rifrazione.

29. La rifrazione della luce . . . . » 32
30. Leggi della rifrazione . . . . . » 33
31. Esperienza del bastone spezzato » 34
32. Indice assoluto di rifrazione . . » 34
33. Angolo limite . . . . . » 36
34. Riflessione totale . . . . . » 36
35. Prisma a riflessione totale . . . » 38
36. Rifrazione atmosferica . . . . » 38
37. Miraggio - Fata morgana . . . » 39
38. Rifrazione attraverso una lastra » 40
39. Relazione tra gli indici di rifrazione . . . . . » 41
40. Prisma . . . . . » 42
41. Leggi della deviazione del prisma » 44
42. Misura dell'indice di rifrazione » 45

Dispersione della luce.

43. Scomposizione della luce bianca » 46
44. Ricomposizione della luce bianca » 47
45. Arcobaleno . . . . . » 47

Lenti.

46. Lenti . . . . . » 49
47. Lenti convergenti . . . . . » 49
48. Fuoco . . . . . » 50
49. Punti coniugati . . . . . » 52
50. Centro ottico - Assi secondari - Piani focali . . . . . » 53

51. Costruzione grafica dell'immagine . . . . . *Pag.* 54
52. Ingrandimento . . . . . » 56
53. Lenti divergenti . . . . . » 57
54. Applicazioni delle lenti - Fari . » 59

Acromatismo.

55. Acromatismo nei prismi . . . . » 60
56. Acromatismo nelle lenti . . . . » 62

La visione.

57. Occhio . . . . . » 62
58. Formazione dell'immagine . . . » 63
59. Accomodamento della vista . . » 64
60. Difetti della vista . . . . . » 64
61. Persistenza delle immagini sulla retina . . . . . » 67
62. Percezione del movimento . . . » 68
63. Cinematografo . . . . . » 68
64. Visuale - Grandezza apparente - Acuità visiva . . . . . » 69
65. Percezione delle distanze . . . . » 70
66. Percezione del rilievo - Stereoscopio . . . . . » 70

Strumenti ottici.

67. Strumenti ottici . . . . . » 72
68. Macchina fotografica - Aberrazioni dei sistemi ottici . . . . » 72
69. Apparecchio di proiezione . . . » 75
70. Microscopio semplice . . . . . » 77
71. Microscopio composto . . . . . » 78
72. Cannocchiale astronomico . . . » 80
73. I grandi cannocchiali . . . . . » 81
74. Cannocchiale terrestre . . . . . » 83
75. Cannocchiale di Galileo . . . . » 83
76. Cannocchiale prismatico . . . . » 84
77. Cenno dei telescopi . . . . . » 86
78. Teodolite . . . . . » 87
79. Cerchio azimutale . . . . . » 88
80. Sestante . . . . . » 89

Fotometria.

81. Intensità luminosa - Unità di luce . . . . . » 91
82. Intensità media sferica . . . . » 92
83. Intensità ed unità di illuminazione . . . . . » 93
84. Flusso luminoso . . . . . » 93
85. Quantità di luce . . . . . » 94
86. Legge delle distanze . . . . . » 94
87. Fotometro di Bunsen . . . . . » 96
88. Fotometro di Rousseau . . . . . » 97
89. Splendore - Legge del coseno . . » 98

OTTICA FISICA

Natura della luce.

90. Ottica geometrica ed Ottica fisica *Pag.* 100
91. Teoria dell'emissione . . . . . » 100
92. Teoria delle ondulazioni . . . . » 101
93. Spiegazione dell'interferenza . . » 103
94. Misura della lunghezza d'onda . » 104
95. Numero delle vibrazioni . . . » 104
96. Come si spiega la riflessione della luce . . . . . » 105
97. Come si spiega la rifrazione della luce . . . . . » 105
98. Diffrazione . . . . . » 106
99. Principio di Huyghens . . . . » 107
100. Spiegazione della diffrazione . » 108
101. Colori delle lamine sottili . . » 108
102. Doppia rifrazione . . . . . » 109
103. Polarizzazione per riflessione . » 110
104. Come si spiega la polarizzazione » 111
105. Polarizzazione per rifrazione . » 112
106. Polariscopio - Prisma di Nicol » 112
107. Polarizzazione rotatoria . . . » 113
108. Polarizzazione cromatica . . . » 114

Spettroscopia.

109. Spettro puro . . . . . » 114
110. Spettroscopio . . . . . » 115
111. Spettri di emissione . . . . . » 116
112. Analisi spettrale . . . . . » 117
113. Analisi degli astri . . . . . » 118
114. Spettri di assorbimento . . . » 119
115. Spettro del Sole - Righe di Fraunhofer . . . . . » 119
116. Raggi luminosi, calorifici, chimici . . . . . » 121
117. Calore dei corpi . . . . . » 122
118. Colori complementari . . . . » 123

Assorbimento dell'energia raggiante.

119. Calorescenza . . . . . » 124
120. Fosforescenza . . . . . » 124
121. Fluorescenza . . . . . » 124
122. La fotografia . . . . . » 125
123. La fotografia ultrarapida . . . » 126
124. La fotografia a colori . . . . » 128

Produzione artificiale della luce.

125. Produzione della luce per combustione . . . . . » 129
126. Lampade a combustibile liquido » 129
127. Lampade a combustibile gassoso » 130
128. Lampade ad incandescenza . . » 131
129. Lampade a gas illuminante . . » 132

Tecnica dell'illuminazione.

130. Condizioni per la visione normale . . . . . *Pag.* 132
131. Illuminazione diretta - Riflettori . . . . . » 133
132. Rifrattori . . . . . » 135
133. Diffusori . . . . . *Pag.* 136
134. Illuminazione indiretta e semidiretta . . . . . » 136
135. Scelta del sistema di illuminazione . . . . . » 137
136. Distribuzione della lampade . » 138

Parte V.

ELETTRICITÀ E MAGNETISMO

MAGNETOSTATICA

Magneti permanenti.

137. Magneti . . . . . *Pag.* 141
138. Poli magnetici - Azione fra di essi . . . . . » 142
139. Legge di Coulomb - Unità di magnetismo . . . . . » 142
140. Campo magnetico . . . . . » 143
141. Spettri magnetici . . . . . » 144
142. Momento della calamita . . . » 145
143. Esperienza della calamita spezzata . . . . . » 146
144. Induzione magnetica . . . . . » 146
145. Permeabilità magnetica . . . » 147
146. Fatti dipendenti dall'induzione » 149
147. Schermo magnetico . . . . . » 149
148. Magnetizzazione e conservazione delle calamite . . . . . » 150
149. Portata . . . . . » 150
150. Fasci magnetici . . . . . » 151

Magnetismo terrestre.

151. Campo magnetico terrestre . » 151
152. Declinazione magnetica . . . » 152
153. Inclinazione magnetica . . . . » 152
154. Carte magnetiche . . . . . » 154
155. Bussola . . . . . » 155

ELETTROSTATICA

Azioni elettriche.

156. Elettrizzazione per strofinìo . *Pag.* 157
157. Pendolino elettrico . . . . . » 158
158. I due stati elettrici . . . . . » 158
159. Attrazioni e ripulsioni elettriche » 158
160. L'atomo e l'elettrone . . . . » 159
161. Come si spiega l'elettrizzazione » 159
162. Corpi conduttori ed isolanti . » 160
163. Isolatore di Mascart . . . . . » 160
164. Tutti i corpi si elettrizzano per strofinìo . . . . . » 161
165. Elettroscopi . . . . . » 161
166. Elettrizzazione per influenza . » 162
167. Applicazioni dell'influenza elettrostatica . . . . . » 163

Quantità d'elettricità.

168. Carica elettrica . . . . . *Pag.* 163
169. Legge di Coulomb . . . . . » 164
170. Unità di elettricità . . . . . » 164
171. L'elettricità risiede alla superficie esterna dei conduttori . . » 165
172. Densità elettrica . . . . . » 166
173. Tensione elettrostatica . . . . » 167
174. Potere delle punte . . . . . » 167

Potenziale.

175. Potenziale elettrico . . . . . » 168
176. Analogie idrauliche . . . . . » 170
177. Unità di potenziale . . . . . » 171
178. Campo elettrico - Linea di forza » 171
179. Potenziale in un punto . . . » 172
180. Superficie equipotenziale . . . » 173
181. Energia di un conduttore elettrizzato . . . . . » 174
182. Elettrometri . . . . . » 175
183. Scintilla . . . . . » 176
184. Forza elettromotrice . . . . . » 177

Capacità elettrostatica.

185. Capacità di un conduttore . . » 177
186. Unità di capacità . . . . . » 178
187. Leggi della capacità . . . . . » 178
188. Costante dielettrica . . . . . » 180

Condensatori.

189. Leggi dei condensatori . . . . » 181
190. Varie forme di condensatori . » 181
191. Scariche residue . . . . . » 183
192. Riunione di più condensatori . » 183

Macchine elettrostatiche.

193. Varie specie di macchine elettrostatiche . . . . . » 184
194. Macchine a strofinìo - Macchina di Ramsden . . . . . » 185
195. Macchina ad influenza - L'elettroforo di Volta . . . . . » 186
196. Macchina di Wimshurst . . . » 187

Effetti della scarica elettrica.

197. Effetti luminosi . . . . . *Pag.* 189
198. Effetti calorifici . . . . . » 189
199. Effetti chimici . . . . . » 190
200. Effetti meccanici . . . . . » 191
201. Effetti fisiologici . . . . . » 192

Effetti luminosi della scarica.

202. Aspetti della scintilla . . . . » 192
203. Ionizzazione e sue cause . . . » 194
204. Scarica nei gas rarefatti . . . » 194
205. Raggi catodici . . . . . » 196
206. Elettroni . . . . . » 198
207. Positroni - Raggi anodici . . » 199
208. Raggi X . . . . . » 199
209. Fluoroscopia . . . . . » 202
210. Radiografia . . . . . » 203
211. Tubi termoionici . . . . . » 203
212. Applicazione dei raggi X . . . » 205
213. Effetto fotoelettrico . . . . . » 206

Radioattività.

214. Radio . . . . . » 207
215. I raggi dei corpi radioattivi - Emanazione . . . . . » 207
216. Energia interatomica . . . . » 208

Costituzione della materia.

217. La teoria atomica . . . . . » 209
218. Il numero di Avogadro . . . » 210
219. Costituzione granulare della materia . . . . . » 211
220. L'atomo elettrico . . . . . » 211
221. I raggi anodici . . . . . » 212
222. Isotopismo . . . . . » 212
223. Il protone - Il positrone - Il neutrone - Il fotone . . . . . » 213
224. Gli ioni . . . . . » 214
225. Come si formano le molecole . » 214
226. La radioattività . . . . . » 214
227. L'atomo nucleare di Rutherford » 216
228. Il numero atomico . . . . . » 217
229. La trasformazione dell'atomo . » 217
230. I quanti di Planck . . . . . » 218
231. L'atomo di Bohr . . . . . » 219
232. Le radiazioni ultrapenetranti » 221
233. Conclusioni . . . . . » 221

ELETTRODINAMICA

Elettricità di contatto.

234. Esperienza di Galvani . . . . *Pag.* 223
235. Elettroscopio condensatore . . » 224
236. Esperienze di Volta . . . . . » 224
237. Leggi di Volta sulle tensioni . » 226
238. Origine della f. e. m. di contatto . . . . . » 226
239. Pila di Volta . . . . . » 227
240. La corrente elettrica . . . . . » 228

Effetti chimici della corrente elettrica.

241. Elettrolisi . . . . . *Pag.* 229
242. Altri esempi di scomposizione » 230
243. Reazioni secondarie . . . . . » 231
244. Elettrolisi dell'acqua . . . . . » 232
245. 1ª legge dell'elettrolisi . . . » 232
246. Intensità della corrente . . . » 233
247. 2ª legge dell'elettrolisi . . . . » 234
248. 3ª legge dell'elettrolisi . . . . » 234
249. 4ª legge dell'elettrolisi . . . . » 234
250. 5ª legge dell'elettrolisi . . . . » 235
251. Dissociazione elettrolitica . . . » 235
252. Carica dell'elettrone . . . . . » 236
253. Teoria elettrolitica della pila . » 237

Applicazioni dell'elettrolisi.

254. Estrazione e raffinazione dei metalli . . . . . » 238
255. Fabbricazione di sostanze chimiche . . . . . » 239
256. Galvanoplastica . . . . . » 240
257. Galvanostegia . . . . . » 241

Polarizzazione.

258. Polarizzazione della pila . . . » 241
259. Pila di Daniell . . . . . » 242
260. Pila di Bunsen . . . . . » 242
261. Pila di Poggendorff . . . . . » 243
262. Pila di Grenet o a bottiglia . . » 243
263. Pila Leclanché . . . . . » 244
264. Pile a secco . . . . . » 245

Accumulatori.

265. Accumulatori elettrici . . . . » 245
266. Capacità dell'accumulatore . . » 246
267. Carica e scarica dell'accumulatore . . . . . » 247

Resistenza dei conduttori.

268. Resistenza elettrica . . . . . » 349
269. Variazione della resistenza con la temperatura . . . . . » 250
270. Bolometro - Pirometro elettrico » 251

Legge di Ohm.

271. Legge di Ohm . . . . . » 251
272. Unità di resistenza . . . . . » 252
273. Reostato . . . . . » 253
274. Cassette di resistenza . . . . » 254
275. Principî di Kirchhoff . . . . » 254
276. Circuiti derivati . . . . . » 256
277. Ponte di Wheatstone . . . . » 256
278. Ponte di Kohlrausch . . . . » 258
279. Aggruppamento degli elementi di una pila . . . . . » 259

Energia elettrica.

280. Potenza della corrente . . . . *Pag.* 260
281. Energia elettrica . . . . . » 261

Effetti termici della corrente elettrica.

282. Calore svolto dalla corrente - Legge di Joule . . . . . » 262
283. Temperatura del circuito . . . » 262

Illuminazione elettrica.

284. La luce elettrica . . . . . » 263
285. Lampade ad incandescenza . . » 263
286. Lampade ad arco . . . . . » 265
287. Altre applicazioni . . . . . » 267
288. Forni elettrici . . . . . » 268

Correnti termoelettriche.

289. Corrente termoelettrica . . . . » 271
290. Potere termoelettrico . . . . » 271
291. Pile termoelettriche . . . . . » 272
292. Effetto Peltier . . . . . » 273

Elettromagnetismo.

293. Campo magnetico della corrente elettrica . . . . . » 273
294. Esperienze di Oersted . . . . » 274
295. Moltiplicatore . . . . . » 275
296. Legge elementare di Laplace » 275
297. Unità elettromagnetica assoluta di corrente . . . . . » 276
298. Foglietto elettromagnetico . . » 276
299. Ipotesi sul magnetismo - Il magnetone . . . . . » 277
300. Solenoide elettromagnetico . . » 277
301. Elettrocalamite . . . . . » 279
302. Saturazione e isteresi magnetica - Curva di magnetizzazione . . » 280

Galvanometri - Amperometri Voltmetri.

303. Bussola delle tangenti . . . . » 282
304. Galvanometri . . . . . » 283
305. Galvanometro di Depretz-D'Arsonval . . . . . » 285
306. Amperometri . . . . . » 285
307. Voltmetro . . . . . » 286
308. Galvanometri derivati . . . . » 287

Applicazione delle elettrocalamite.

309. Suoneria elettrica . . . . . » 288
310. Telegrafo Morse . . . . . » 289
311. Telegrafia transoceanica . . . » 292
312. Orologi elettrici - Trasmettitori d'ordine . . . . . » 293

Azioni elettrodinamiche.

313. Le azioni elettrodinamiche . . *Pag.* 293
314. Conseguenze delle leggi di Ampère . . . . . » 295
315. Elettrodinamometro - Wattmetro . . . . . » 296

L'ENERGIA ELETTRICA ED IL MOVIMENTO.

Induzione elettromagnetica.

316. Induzione fra circuiti . . . . *Pag.* 298
317. Induzione con le calamite . . » 299
318. Correnti indotte di chiusura e di apertura . . . . . » 299
319. Legge di Neumann . . . . . » 300
320. Legge di Lenz . . . . . » 301
321. Regola di Fleming . . . . . » 301
322. Correnti di Foucault . . . . . » 302
323. Autoinduzione . . . . . » 303
324. Induttanza . . . . . » 304
325. Rocchetto di Ruhmkorff . . . » 305

Telefono.

326. Il telefono . . . . . » 309
327. Microfono . . . . . » 311
328. Microfono con rocchetto . . . » 312
329. Centrale telefonica . . . . . » 312

Macchine magneto-elettriche e dinamo-elettriche.

330. Produzione della corrente elettrica col movimento . . . . . » 314
331. Esperienza di Palmieri . . . . » 314
332. Corrente pulsante . . . . . » 316
333. Macchina magneto-elettrica del Siemens . . . . . » 317
334. Anello di Pacinotti . . . . . » 317
335. Macchine magneto e dinamo-elettriche - Eccitazione della dinamo . . . . . » 319
336. Rendimento della dinamo - Dinamo multipolari . . . . . » 321
337. Alternatori . . . . . » 322

Correnti alternate.

338. Rappresentazione grafica della corrente alternata . . . . . » 324
339. Valori efficaci della f. e. m. e della intensità della corrente alternata . . . . . » 324
340. Fattore di potenza . . . . . » 325
341. Corrente monofase . . . . . » 325
342. Corrente bifase . . . . . » 326
343. Corrente trifase . . . . . » 327

Motori elettrici.

344. Elettromotori . . . . . *Pag.* 328
345. Alternatori sincroni . . . . . » 330
346. Alternomotori asincroni . . . » 330
347. Campo magnetico rotante . . » 331
348. Motore a campo magnetico rotante . . . . . » 334
349. Trazione elettrica . . . . . » 334

Trasporto dell'energia a distanza.

350. Le energie naturali . . . . . » 337
351. Scelta della corrente . . . . . » 338
352. I trasformatori statici . . . . » 339
353. I moderni impianti idroelettrici » 342
354. Distribuzione dell'energia elettrica . . . . . » 342
355. Feeders e distributori . . . . » 344

Le oscillazioni elettriche.

356. Scarica oscillatoria . . . . . » 345
357. Onde elettromagnetiche . . . » 347
358. Esperienze di Hertz . . . . . » 348
359. Teoria elettromagnetica della luce . . . . . » 349
360. Oscillatore e risonatore del Righi *Pag.* 350
361. Coherer . . . . . » 351

Radiotrasmissioni.

362. Telegrafia senza fili . . . . . » 351
363. Oscillazioni persistenti . . . . » 354
364. Audion . . . . . » 354
365. L'audion come trasmettitore . » 356
366. L'audion come ricevitore . . . » 357
367. Radiotelefonia . . . . . » 359
368. Le microonde . . . . . » 362
369. Televisione . . . . . » 362
370. Cinema sonoro . . . . . » 364
371. Il presente e l'avvenire delle radiotrasmissioni . . . . . » 365

Elettricità atmosferica.

372. Potenziale elettrico dell'atmosfera . . . . . » 369
373. Lampi e tuoni . . . . . » 369
374. Fulmine . . . . . » 370
375. Parafulmine . . . . . » 370
376. Aurore boreali . . . . . » 372

LIRE DICIOTTO